Zur Kenntnis

des

hochgespannten Wechselstrom-Lichtbogens.

Von

Dr. Johann Joseph Stöckly.

Zur Kenntnis

des

hochgespannten Wechselstrom-Lichtbogens.

Inaugural-Dissertation,

der

mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Universität Freiburg in der Schweiz

zur

Erlangung der Doktorwürde

vorgelegt von

Johann Joseph Stöckly,

aus Birri-Muri, (Aargau).

ACAD. IMPRIMAT. KIEL

FREIBURG (Schweiz)

St.-Paulus-Druckerei.

—

1910

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41545305_0057

Die vorliegende Arbeit wurde im physikalischen Institut der Universität Freiburg (Schweiz) unter der Leitung des Herrn Prof. Dr. von Kowalski ausgeführt, und im Dezember 1908 der Fakultät eingereicht.

Ich bin meinem verehrten Lehrer für die zahlreichen Anregungen, welche er mir hat zu Teil werden lassen, zu viel Dank verpflichtet.

in Gasen» belegt hat, das Gemeinsame, erst seit der Einführung der Jonentheorie die fruchtbarsten Erfolge erzielt zu haben. Deshalb auch müßte eine allseitig vollständige Literaturangabe es nicht unterlassen, die Entwicklung der Anschauungen über den Glimmstrom und die Funkenentladung eingehend zu verfolgen. Ein so ausgedehntes Verfahren schien mir indessen im Hinblick auf jene ausführlichen Arbeiten nicht notwendig. Ich will deshalb nur die Literatur des neuen Jahrhunderts eingehend verfolgen, von den ältern Veröffentlichungen aber nur das Wichtigste erwähnen und mich im Übrigen auf obige Monographien berufen.

1. Teile des Lichtbogens.

In transversaler Richtung unterscheidet man am elektrischen Lichtbogen außen auf der Grenze zwischen Luft und Metalldampf (Elektrodendampf) eine schlechtleitende rotgelbe Hülle « Aureole » und einen innern bläulich leuchtenden Kern, der vom Dampf des Elektrodenmaterials gebildet wird. Kern und Aureole können leicht zur Seite geblasen werden, wobei bei Wechselstrom und hoher Spannung ein weißblauer Faden zum Vorschein kommt, der von rasch aufeinander folgenden Zündfunken gebildet wird. In longitudinaler Richtung tritt aus der Kathode auf dünnem Stiele, sich rasch verbreitend, das kathodische Lichtbüschel hervor. Zwischen ihm, den « dunklen Zwichenraum » freilassend, folgt die positive geschichtete oder ungeschichtete Lichtsäule, an die sich unmittelbar vor der Anode die intensiver leuchtende Anodenschicht anschließt. Dunkler Zwischenraum, positive Lichtsäule und Anodenschicht hat der Lichtbogen mit dem Glimmstrom gemein ; der einzige Unterschied besteht in dem kathodischen Be-

standteil. « Es ist daran festzuhalten, daß im Lichtbogen die negativen Jonen unmittelbar aus der Kathode selbst und zwar nicht durch Jonisierung, sondern durch Elektrisierung gewonnen werden [1]. » Dagegen im Glimmstrom werden die negativen Jonen innerhalb des Dampfraumes durch den jonisierenden Stoß der positiven Jonen gewonnen. Zufolge der hohen Temperatur [2] der Kathode treten [3] aus derselben die negativen [4] Elektronionen in großer Zahl hervor in den angrenzenden Dampfraum, wo durch den Stoß derselben mit den da vorhandenen Gas- und Dampfmolekülen neue Elektronionen, Atomionen und zu geringem Teile in den kälteren Partien wohl auch Molionen [5] gebildet werden. Die Bewegungen der drei vorhandenen Jonenarten sind von charakteristischen optischen [6] und lichtelektrischen [7] Phänomenen begleitet.

2. Elektrodenspannung.

Der gesamte Spannungsabfall im Lichtbogen verteilt sich gemäß der vorigen Beschreibung in den Kathodenfall, den Spannungsabfall in der positiven Lichtsäule und den Anodenfall. Die Verteilung ist aber selbst nicht konstant, sondern variiert mit dem Elektroden-

[1] J. Stark, Drude's Ann. **12,** 682, 1903.

[2] Violle, C. R. **115,** 1273, 1892.

[3] O. W. Richardson, Proc. Roy. Soc. **71,** 415, 1903.

[4] J. J. Thomson, Ph. Mag. **48,** 547, 1899.

[5] C. Chéneveau, L'éclair. électr. **20,** 401, 1899 und C. D. Child, Phys. Rev. **10,** 151, 1900, Suinton, Phys. Rev. **10,** 151, 1906.

[6] G. A. Hemsalech, Mem. and Proc. Man. Soc. **48,** X, 1905; J. Stark, 4. Ann. Ph. **14,** 506, 1904; J. Stark und Küch, Ph. Z. **6,** 438, 1905; Schuster und Hemsalech.

[7] W. Hallwachs, 4. Ann. Ph. **13,** 38, 1904; R. Küch und I. Retschinski, 4. Ann. Ph. **20,** 563, 1906.

material, der Stromstärke, der Bogenlänge, der Art und dem Druck des umgebenden Gases.

Der Spannungsabfall in der positiven Lichtsäule wächst mit steigendem Druck, nimmt ab mit der Stromstärke und verändert sich mit der Verdampfung des Elektrodenmaterials [1]. Der Kathodenfall ist abhängig von der Stromstärke, der Anodenfall überdies noch von der Bogenlänge und dem Querschnitt.

Um das Vorhandensein der beiden an Kathode und Anode vorhandenen Potentialgefälle zu erklären, sind verschiedene Hypothesen gemacht worden. Edlund [2] glaubte, gestützt auf die geringe Abhängigkeit von der Stromstärke und dem Elektrodenabstand, an eine elektromotorische Gegenkraft, die durch Polarisation der Elektroden entstände. Fußner [3] meinte, daß das Potentialgefälle vor den beiden Elektrodenflächen zufolge der Verdunstung der beiden Elektrodenflächen verursacht werde.

Und H. Ayrton [4] wollte gewisse Übergangswiderstände annehmen, indem sie sich überlegte, daß eine Verminderung der Elektrodenflächen eine Vergrößerung der Übergangswiderstände bewirken müsse. Ob aber bei den elektrischen Vorgängen in Gasen die Anwendung des Ohm'schen Gesetzes in seiner ursprünglichen Form überhaupt einen Sinn hat, ist durch die Untersuchungen von W. Kaufmann [5] und J. Stark [6] in Frage gestellt worden.

[1] J. Stark und L. Cassuto, Ph. Z. **5**, 264, 1904; L. Cassuto, Ph. Z. **5**, 263, 1904.

[2] Edlund, Pogg. Ann. **131**, 586, 1867.

[3] Fußner, Centr. f. El. **10**, 3.

[4] H. Ayrton, Proc. Roy. Soc. **68**, 410, 1901.

[5] W. Kaufmann, Ph. Z. **1**, 348, 1900.

[6] J. Stark, Dr. Ann. **5**, 90, 1901.

Für den Kathoden- und Anodenfall bei einem Kohlenlichtbogen in Luft hat Frau Ayrton [1] folgende Ausdrücke angegeben :

$$K = 7{,}6 + \frac{13{,}6}{i} \text{ Volt} \qquad A = 31{,}28 + \frac{q + 3{,}1.l}{i} \text{ Volt}$$

Da der Lichtbogen eine selbständige Strömung ist, muß er eine Minimalspannung besitzen. Es ist die Elektrodenspannung bei verschwindend kleiner Bogenlänge, d. h. die Summe von Kathoden- und Anodenfall.

Die Darstellung der Beziehungen, welche V Elektrodenspannung, J Stromstärke und l Bogenlänge mit einander verbinden, ist von vielen Autoren [2] versucht worden. Die Formel von Frau Ayrton [3] ist gegenwärtig als die den Tatsachen am exaktesten entsprechende Beschreibung der Vorgänge im Lichtbogen anerkannt.

$$V = \alpha + \beta.l + \frac{\gamma + \delta.l}{J}$$

Es stellen hierin α, β, γ, δ Constante dar, die nur von den Eigenschaften der Elektroden abhängen. Die (VJ)-Kurven sind also bei constantem Abstande rechtwinklige Hyperbeln. Die numerischen Größen der Constanten sind für einen Kohlenlichtbogen von Frau Ayrton angegeben worden.

$\alpha = 38{,}88$ $\qquad$ $\gamma = 11{,}66$

$\beta = 2{,}074$ $\qquad$ $\delta = 10{,}54$

Ähnliche Formeln mit numerischen Angaben für die

[1] Ayrton, El. **41,** 720, 1898; Nat. **58,** 533, 1898.

[2] H. Ayrton, The electric arc.

[3] Zusammenstellung bei Monasch, p. 38, 1904.

Constanten sind von C. E. Guye und L. Zébrikoff[1] für die Metalle (Pt, Au, Ag, Pll, Cu, Co, Ni, Fe) aufgestellt worden. Eine Prüfung für einen Cu-Lichtbogen bei hohen Stromstärken liegt von A. Grau und F. Ruß[2] vor. Schreitet der Zustand des C-Lichtbogens auf der Leitungshyperbel nach der Richtung größerer Stromstärke vorwärts, so wird ein Punkt erreicht, wo die Elektrodenspannung plötzlich um circ. 10 Volt sinkt und die Stromstärke um 2 bis 3 Ampere zunimmt, während gleichzeitig der Bogen ein zischendes[3] Geräusch von sich gibt. Ein analoges Stadium, welches aber dem Zischen des Kohlenbogens keineswegs direkt entspricht, ist von Cady[4] im Jahre 1906 am Eisenlichtbogen beobachtet worden. Diese Entdeckung sollte eine Reihe ganz neuer Gesichtspunkte eröffnen.

Schon im Jahre 1904 hatte Duddell[5] in einer Besprechung der Ayrton'schen Formel darauf aufmerksam gemacht, daß dieselbe nicht für alle Stromstärken und besonders nicht für ganz kleine Ströme und große Bogenlängen anwendbar sei. In einer neuen größern Arbeit von Cady und Arnold[6] im Gebiete kleiner Stromstärken zwischen Kohlen- und Metallelektroden werden sehr interessante Angaben gemacht, die ich, so weit sie diese Frage betreffen, hier direkt wiedergeben will: 1. Zwischen Eisenelektroden in freier Luft be-

[1] Guye und Zébrikoff, Ph. Z. **8,** 703, 1907.

[2] A. Grau und F. Ruß, Ph. Z. **9,** 107, 1908.

[3] Mrs. H. Ayrton, Journ. of the Inst. of Electric Engin. **28,** 400, 1899; Léclair. électr. **19,** 388, 1899 und Elektr. Anz. **16,** 1286, 1899.

[4] W. G. Cady, Nature **74,** 443, 1906.

[5] W. Duddell, Phil. Trans. **203,** 305, 1904.

[6] W. G. Cady und H. D. Arnold, Ph. Z. **8,** 890, 1907; siehe auch: Macolm, Ph. Z. **8,** 471, 1907.

stehen zwei Typen des Bogens, die von einander in ihrem Aussehen und in ihrer Charakteristik verschieden sind. Der Kürze wegen wenden wir für diese Typen die Bezeichnungen « erstes und zweites Stadium » an. Der Übergang von einem Stadium zum andern ist dem Zischpunkte des Kohlenbogens einigermaßen ähnlich ; die Ursache ist aber nicht dieselbe. Aus dem Massenverlust der Elektroden, dem Spektrum und der Temperatur des Bogens geht deutlich hervor, daß das erste Stadium durch das Fehlen einer Verdampfung der positiven Elektrode charakterisiert ist. Bei Kupfer und Eisen konnten diese beiden Stadien stetig unterhalten werden. Wir haben Grund zu der Annahme, daß man mit den meisten andern Metallen ähnliche Ergebnisse erhalten kann : Platin und Eisen, welche von jeder Spur von Oxyd frei waren, wiesen unter keinen Bedingungen ein stabiles erstes Stadium auf. Es lassen sich also für die Entladung zwischen Metallen drei charakteristische Kurven ziehen : Die Charakteristik des Glimmstromes, des Lichtbogens im ersten Stadium und im zweiten Stadium. Für Kohlenelektroden besteht noch ein weiteres Stadium, das des zischenden Bogens, wobei noch ein weiterer plötzlicher Spannungsabfall bewirkt wird. Es ist auch in der Tat den beiden Gelehrten gelungen, durch passende Änderung der Stromstärke und des umgebenden Gases alle vier Arten der Entladung zwischen Kohlenelektroden zu erhalten.

Gestützt auf die Beobachtungen von Duddell und die eingehenden Untersuchungen von Cady und Arnold ließe sich das Urteil über die besprochene Formel etwa so zusammenfassen :

Die Ayrton'sche Formel stellt die Beziehungen zwischen Spannung, Stromstärke und Bogenlänge eines elektrischen Lichtbogens im allgemeinen befriedigend

dar, besonders etwa auch in dem Gebiete, in dem die Forscherin selbst gearbeitet hat. Wenn aber durch entsprechende Abänderungen einer Variablen das ganze Gebiet der Charakteristik sowohl großer als auch sehr kleiner Stromstärken abgeschritten wird, so werden gewisse Diskontinuitätsstellen angetroffen, wo zufolge momentaner Änderungen im Lichtbogen die Constanten der Formel plötzlich andere numerische Werte annehmen.

Die Elektrodenspannung variiert des weiteren mit dem Gasdruck und zwar in dem Sinne, daß mit wachsendem Gasdruck die Elektrodenspannung zu- und die Stromstärke abnimmt und umgekehrt [1]. Die Größe der Empfindlichkeit des Lichtbogens gegen Luftdruckschwankungen hat zu den sehr interessanten Untersuchungen über den « sprechenden und selbsttönenden Lichtbogen » [2] geführt.

Die Abhängigkeit vom Elektrodenmaterial [3] ist eine doppelte. Einmal ist der Anoden- und Kathodenfall bei verschiedenen Metallen verschieden und zweitens wird die positive Lichtsäule mit verschiedenem Metalldampf gespeist. Untersuchungen, die die Abhängigkeit vom umgebenden Gase und dem Elektrodenmaterial darlegen sollen, sind von Arons [4], H. W. Macolm [5], Cady

[1] L. Arons, Ann. Ph. **1,** 700, 1900; Guye und Monasch, Ecl. El. **34,** 305, 1903.

[2] H. Th. Simon, W. Ann. **64,** 233, 1898. E.I.Z. 510, 1901; W. Duddell, El. **46,** Nr. 8 und 9, 1900; H. Th. Simon, Ph. Z. **6,** 297, 1905; Ph. Z. Z. 433, 1907; Jahrb. drathl. Telegr. und Teleph. Heft **1,** 1907; H. Barkhausen.

[3] Günther-Schulze, Diss., Hannover, Ann. Ph. **12,** 828, 1903.

[4] Arons, Dr. Ann. **1,** 700, 1900; Ph. Z. **1,** 53, 1899.

[5] H. W. Macolm, Ph. Z. **8,** 471, 1907.

und Arnold[1] u. a. ausgeführt worden. Arons stellte Untersuchungen an an Metallichtbögen in Stickstoff und Wasserstoff. Er macht auf die Nitritbildung bei Magnesium und Aluminium aufmerksam und die Schwierigkeit, Metallichtbögen in Wasserstoff zu unterhalten. Macolm stellt fest, daß die durch den Sauerstoff bewirkte Verbrennung der Kohlenelektroden als sekundäre Jonisationsquelle wirke und die gesamte Charakteristik auf niedrigere Spannungswerte herabdrücke. Ein analoger, mit Wärmeentwicklung verbundener Prozeß spielt sich offenbar auch an Kohlen in einer Stickstoffatmosphäre ab. In Wasserstoff und bei eingeschlossenem Bogen, wo jene sekundären Prozesse an den Kohlen wegfallen, erhält man sehr hoch liegende Charakteristiken. Dasselbe beobachtet er in Wasserdampf. Abnormhohe Spannungswerte in Wasserdampf werden auf seine große Wärmeleitfähigkeit und große Jonenbeweglichkeit zurückgeführt. Die Luft wirkt in ganz gleicher Weise bei den Metallen durch Oxydation als sekundärer Jonisator; weshalb auch hier die Charakteristik für Wasserstoff viel höher liegt.

3. Existenzbedingung des Lichtbogens.

Der Lichtbogen erhält gleich wie der Glimmstrom die positiven Jonen aus dem Innern der Gasstrecke geliefert, wo sie durch Jonisierung durch die negativen Elektronionen gebildet werden. Während aber bei Glimmstrom nur die positiven Jonen unter dem Einfluß des normalen Kathodenfalles Jonisierungsspannung erreichen und auf das Gas wirken, erlangen im Lichtbogen die positiven Jonen, viel größer an Zahl, unter dem

[1] Cady und Arnold, Ph. Z. **8**, 890, 1907.

Einfluß des allerdings zehnmal kleinern Kathodenfalles auch eine große kinetische Energie, die sie aber direkt an die Elektroden abgeben und dieselben erhitzen, so daß sie zu heftigem Aussenden von negativen Elektronionen veranlaßt werden. Nach den Versuchen von O. W. Richardson [1], die er an Pt und C. gemacht hat, senden Oberflächen von hoher Temperatur negative Elektronionen in sehr großer Zahl aus. Seine Messungen erstrecken sich bis zu cir. 1600°. Sie lassen sich durch die Formel darstellen:

$$j = A.T^{1/2}.e^{-\frac{b}{T}},$$

wobei j = Stromdichte in statistischem Maße auf 1 cm², T die absolute Temperatur, A und b Constanten sind, während e die Basis des natürlichen Logarithmensystems darstellt. Er fand für Platin und Kohle bezüglich:

$$\text{Pt} \begin{cases} A = 10^{26} \\ b = 4{,}93 . 10^4 \end{cases} \qquad \text{C.} \begin{cases} A = 10^{34} \\ b = 7{,}8 . 10^4\text{-}11{,}9 . 10^4 \end{cases}$$

Die größte von ihm beobachtete Stromdichte betrug 2 Amper pro cm². Wenn wir aber bedenken, daß die Dichte der ausgeströmten Elektronionen mit steigender Temperatur sehr schnell zunimmt und daß anderseits die Temperatur des negativen Kohlenlichtbogenkraters von Violle [2] zu 2700° C angegeben wurde, so dürften wir wohl zu Stromdichten gelangen, die mit denen des Lichtbogens vergleichbar wären.

« Hohe Temperatur in der kathodischen Strombasis des Lichtbogens ist also eine notwendige Bedingung

[1] O. W. Richardson, Proc. Roy. Soc. **71**, 415, 1903; Phil. Trans. **201**, 497, 1903.

[2] Violle, C. R. **115**, 1273, 1892.

dafür, daß aus der Lichtbogenkathode in den angrenzenden Dampfraum negative Elektronionen in großer Zahl austreten [1]. » Es ist deshalb von großem Interesse, die von den positiven Jonen an die Kathode in Form von Wärme abgegebene Energie gut zu konservieren und nicht etwa durch unzweckmäßige sekundäre Einflüsse, wie Leitung durch die Elektroden, verloren gehen zu lassen. In einer wichtigen Arbeit « über den Einfluß des Wärmeleitungsvermögens der Elektroden im elektrischen Lichtbogen » hat G. Granquist [2] diesbezügliche Untersuchungen angestellt. Indem er die eine Elektrode in ein Kalorimetergefäß einschloß und durch einen Asbestdeckel gegen die gegenüberliegende Elektrode schützte, bestimmte er den Prozentsatz der gesamten Wärme des Kohlenlichtbogens, der durch Leitung durch die Elektroden fortgeführt wird, zu im Minimum 79 %. Die Kathode ist hieran entsprechend ihrer niedrigeren Temperatur 2700° C mit 37 %, die Anode bei einer Temperatur von 3500° C mit 42 % beteiligt. So können wir also sagen, im Kohlenlichtbogen gehen 80 % der Lichtbogenwärme durch Leitung verloren. Würde eine Kupferkathode verwendet, so bewirkte sie allein schon einen Verlust von 45 %. Es wird deshalb das Entstehen und Fortbestehen des elektrischen Lichtbogens erleichtert, wenn die Wärmeleitung vermindert oder kompensiert, d. h., wie schon de la Rive [3] und Lecher [4] gefunden, die Elektroden etwa direkt erwärmt werden.

[1] J. Stark, Dr. Ann. **12,** 687, 1903.
[2] G. Granquist, Nova acta reg. Soc. Upsal. **20,** f. 2, 1904.
[3] de la Rive, Pg. Ann. **60,** 385, 1843, **76,** 270, 1849.
[4] Lecher, Wien. Sitz, b. 992, 1887.

4. Größe und Temperatur der Kraterflächen.

Granquist hat in seiner Arbeit l. c. auch experimentell nachgewiesen, daß die Wärmeleitfähigkeit der Elektroden die Kraterflächen in dem Sinne beeinflußt, daß mit größerem Leitungskoeffizienten die Kraterflächen sich zusammenziehen und demzufolge der Spannungsabfall für die betreffende Elektrode und zu geringem Teile auch in der positiven Lichtsäule vergrößert wird und umgekehrt. Messungen über die Temperatur und Größe der Kraterflächen liegen in ziemlich ausgedehntem Maße vor. Hievon beziehen sich die älteren Messungen der höheren Temperatur wegen vorzüglich auf die positive Kohle, die neueren Untersuchungen dagegen besonders auf die negative Kohle, zufolge der größeren Wichtigkeit, welche die Jonentheorie ihr beigelegt hat. Die Methoden lassen sich in drei Gruppen zusammenfassen.

1. Violle [1] warf die Spitze der Kohle während des Brennens in ein Kalorimetergefäß und ermittelte so in primitiver Weise die Temperatur.

2. E. Becquerel [2], Rosetti [3], Wilson and Gray [4] und andere arbeiteten nach Methoden, die auf Photometrie und Wärmestrahlung begründet waren.

3. Die neuesten Messungen von Le Chatelier [5], Very [6], Lummer [7] und Pringsheim, Wanner [8],

[1] Violle, C. R. **115,** 1273, 1892, El. 460, 238, 1892/94.
[2] E. Becquerel, Ann. Ph. und Chem. **68,** 49, 1863.
[3] Rosetti, Lum. elektr. **1,** 235, 1879.
[4] Wilson and Gray, Proc. Roy. Soc. **58,** 24, 1895.
[5] Le Chatelier, Journ. phys. **1,** 185, 1892.
[6] Very, Astrophys. Journ. **10,** 208, 1899.
[7] Lummer und Pringsheim, Verh. der phys. Ges. in den Jahren 1894, 1900, 1901,
[8] Wanner, Ann. Ph. **2,** 141, 1900.

Fery [1], Holborn und Kurlbaum [2], Reich [3] u. a. beruhen auf der Anwendung der Strahlungsgesetze von Wien und Max Plank.

In den sehr interessanten Versuchen von Reich dient zur Temperaturbestimmung ein nach Wanner konstruiertes, auf das Wien'sche Gesetz

$$J = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}$$

basiertes Pyrometer. Zur Messung der Kratergrößen wird ein Fernrohr mit einem Mikrometer im Okular angewendet. Bei variablem Strome leistet eine kinomatographische Methode vortreffliche Dienste, wobei der Krater in regelmäßigen Intervallen photographiert wird. Die Größen konnten direkt mit der Teilmaschine bestimmt werden und die Temperatur wurde aus der jeweiligen Schwärzung der Platte nach besonderen Methoden photometrisch gemessen, während gleichzeitig Strom- und Spannungskurve mit einem Duddell'schen Hochfrequenzoscillographen aufgezeichnet wurden. Die Resultate lassen sich so zusammenfassen:

1. Die Temperatur des negativen Lichtbogenkraters ist im statischen Zustand unabhängig von der Stromstärke und Bogenlänge. Die Kratergröße läßt sich in Abhängigkeit von der Stromstärke in folgender Form darstellen:

$$F = a + bi + ci^2 \quad .$$

2. Es zeigte sich bei Stromanstieg ein Zurückbleiben der Kratergröße hinter den statischen Werten, das von

[1] Fery, C. R. **134**, 977, 1201, 1902.
[2] Holborn und Kurlbaum, Ann. Ph. **10**, 225, 1902.
[3] M. Reich, Ph. Z. Z. 73, 1906.

der Temperatur des umgebenden Gases abhängig war. Es ergab sich ferner eine Steigerung der Temperatur über den statischen Wert, solange die Kraterfläche ihren statischen Wert noch nicht erreicht hat. Die umgekehrten Verhältnisse sind beim Sinken des Stromes.

3. Das Gleichgewicht der Jonenverteilung im Bogen stellt sich äußerst rasch her; der Bogen selbst folgt den Stromschwankungen in nicht meßbarer Zeit. Der positive Krater wurde bei Stromschwankungen unscharf befunden.

Im wesentlichen war die obige Formel für die Größe des negativen Lichtbogenkraters schon von Granquist bestimmt worden. Er hatte in seiner Arbeit l. c. gefunden, daß der Radius der Kraterfläche

$$r = m + n.i$$

in linearer Weise von der Stromstärke abhängig sei.

Reich zog aus seinen Arbeiten auf die Jonentheorie des Lichtbogens selbst folgende Schlüsse:

4. Die von der Flächeneinheit des Kraters ausgestrahlte Elektronenmenge ist unabhängig von der Stromstärke, denn nach Richardson ist die ausgestrahlte Elektronenmenge für dasselbe Material und denselben Druck nur eine Funktion der Temperatur.

5. Der Kathodenfall ist unabhängig von der Stromstärke, denn würde er sich mit dieser ändern, so würde sich unter sonst gleichen Bedingungen die Geschwindigkeit der Jonen, d. h. die Temperatur der Kathode verändern.

6. Das dritte Glied in der Formel für die Kratergröße, welches das Quadrat der Stromstärke enthält, wird gedeutet als durch das beständige Verschwinden eines gewissen Betrages der Jonen durch Molisierung in der Gasstrecke verursacht.

5. Wechselstromlichtbogen.

Bereits im Jahre 1880 maß Joubert[1] mit einem Elektrometer die Wechselspannung und die Stromstärke mit einem Galvanometer, während er gleichzeitig durch Aufnahme einzelner Momentanwerte von Stromstärke und Spannung in verschiedenen Phasen das Aussehen der Kurven ermittelte. Er fand die Spannungskurve deformiert, während die Stromkurve nur geringe Abweichungen von der Sinusoide aufwies. Nach jeweiligem Stromwechsel fiel die Spannung sehr rasch ab und stieg eben so schnell an. Diese Beobachtungen wurden bestätigt von Tobay, Walbridge and Reid[2]. Sie bemerkten oft am Anfang der Halbperiode eine Spitze der Spannungskurve, in der Mitte der Halbperiode schien dieselbe aber eher etwas eingesunken. Kurvenaufnahmen am elektrischen Lichtbogen wurden seit Joubert von sehr vielen Physikern ausgeführt[3]. Ein genaues und erfolgreiches Studium der Vorgänge im Lichtbogen wurde aber erst möglich gemacht, nachdem Blondel, Duddell und Marchant Oscillographen konstruiert hatten, die es gestatteten, die Strom- und die Spannungskurve oder beide zugleich direkt zu beobachten oder gar photographisch zu fixieren. Was diese Oscillographen bei Wechselströmen niederer und mittlerer Frequenz leisten, dasselbe wird bei Wechselströmen sehr hoher Frequenz durch Anwendung der Braun'schen Röhre erreicht.

Aus mehreren Beobachtungsreihen leitete Heu-

[1] Joubert, C. R. **91,** 161, 1880.

[2] Tobay and Walbridge, Ann. Inst. El. **7,** 367, 1890, Tobey, Walbridge and Reid, Electr. Z. **11,** 633, 1890.

[3] Zusammenstellung der wichtigsten bei Monasch.

bach [1] 1892 die Existenz einer Phasenverschiebung im Wechselstromlichtbogen ab, indem er gleichzeitig Strom und Spannung und mittelst eines Elektrodynamometers die verzerrte Energie bestimmte und als Cosinus des Phasenverschiebungswinkels den Quotienten

$$\frac{\text{Watt}}{\text{Volt} \cdot \text{Amper}} = \cos \varphi$$

berechnete.

Dieses unerwartete Resultat wurde von Protheus Steinmetz [2] in einer analytischen Untersuchung geprüft. Er ging dabei von der Tatsache aus, daß die Lichtbogenstrecke sich verhält wie ein Widerstand, welcher mit der doppelten Periodenzahl des Wechselstroms variiert.

Es zeigte sich, daß unter diesen Umständen über die einfache Welle der E. M. K. oder der Stromstärke oder beider zugleich sich eine Welle mit einer dreifachen Periodenzahl legen muß, so zwar, daß nicht gleichzeitig Stromstärke und E. M. K. Sinuswellen sein können. Wenn aber nicht gleichzeitig E. M. K. und Stromstärke Sinusoiden sind, ist obige Methode der Berechnung einer Phasenverschiebung φ nicht anwendbar, und zahlreiche oscillographische Untersuchungen haben in der Tat gezeigt, daß Strom und Spannung immer zu gleicher Zeit null werden.

Ist ein elektrischer Lichtbogen mit Wechselstrom gezündet, so bleibt er in der ersten halben Periode so lange bestehen, bis die Elektrodenspannung unter einen gewissen Betrag, bei einer bestimmten sinkenden E.M.K., gefallen ist. Sobald aber dies eintritt, erlöscht der Licht-

[1] J. Heubach, E. Z. **13,** 460. 1892.

[2] Steinmetz, E. T. Z. **13,** 567, 1892; auch A. Blondel, Proc. phys. Soc. London **13,** 414, 1895 und E. T. Z. **16,** 610, 1895.

bogen. Die E. M.K. geht dann durch Null, um in entgegengesetzter Richtung zu steigen. Der Lichtbogen, dessen Kratertemperatur und Kraterfläche unterdessen abgenommen hat, muß neu gezündet werden, d. h., es müssen von neuem die Existenzbedingungen hergestellt werden. Bestehen die Elektroden aus einem schlecht leitenden Material, wie etwa Kohle, so kann die Zündung durch unselbständige Strömung bei niederer Spannung geschehen. Haben wir es aber mit gut leitenden Elektroden zu tun, so ist die Abkühlung sehr viel weiter fortgeschritten und die Zündung kann nur bei hoher Spannung durch den Glimmstrom geschehen. Es ist daraus deutlich zu entnehmen, von welch großer Bedeutung die Wärmeleitfähigkeit der Elektroden bei Wechselstrom sein muß. Granquist[1] schreibt also: « Je geringer die Energiezufuhr während des stabilen Zustandes und je größer das Wärmeleitvermögen der Elektroden ist, um so schneller kühlt sich der Bogen ab und um so kürzer muß die Zeit für den labilen Zustand gewählt werden, wenn der Bogen nicht aufhören soll zu brennen. » Wird aber bei konstant angenommener Leitfähigkeit der Elektroden die Periodenzahl vergrößert, sodaß die Intervalle zwischen je zwei Halbperioden, wo kein Strom fließt, verringert werden, so tritt ein, was Barkhausen gezeigt hat, daß ein Wechselstromlichtbogen zwischen Metallelektroden sogar in Wasserstoff bei mehr als 500,000 Perioden sich fast genau so verhält wie ein Kohlenlichtbogen in Luft bei nur 50 Perioden. Ein Metallichtbogen in Luft würde schon bei einer niedrigeren Periodenzahl dem Kohlenlichtbogen äquivalent sein.

Anderseits ist der große graduelle Unterschied

[1] l. c. p. 56.

zwischen Kohlen- und Metallichtbogen auch daran ersichtlich, daß man beim Kohlenlichtbogen den Strom für ca. $\frac{1}{20}$ sec.[1] gänzlich unterbrechen kann, worauf der Bogen mit derselben Spannung sich wieder zünden wird. Dies würde jedoch bei einem Lichtbogen zwischen Metallelektroden nicht mehr geschehen. Es ist nachgewiesen worden, daß ein Metallichtbogen sich bei niedriger Spannung nicht mehr entzündet, selbst wenn die Unterbrechung nur den 10^4ten Teil einer Sekunde betragen hätte.

6. Die drei Zonen.

Zufolge des im Vergleich zu den Metallen niedrigen Wärmeleitungsvermögens der Kohle ist es leicht, einen Wechselstromlichtbogen zwischen Kohlenelektroden zu unterhalten. Es hat auch Arons vermutet, daß eine Reihe von Gasen, die von den Kohlenelektroden ausgesandt werden, unter Umständen die Leitfähigkeit so lange beibehalten. Zwischen Metallelektroden aber ist ein Lichtbogen bei gewöhnlicher Frequenz und Spannung unmöglich. Es gibt also bloß zwei Mittel, um einen Wechselstromlichtbogen zwischen Metallen zu unterhalten. Entweder muß bei genügend hoher Spannung gearbeitet oder, wie es Barkhausen getan hat, eine sehr hohe Frequenz gewählt werden. Das Verhalten des Metallichtbogens bei hoher Spannung und einer Stromstärke von ca. 0,04 Ampère ist nach den Untersuchungen von Guye und Monasch[2] in verschiedenen Elektrodenabständen ein verschiedenes.

[1] Edlund, P. A. 250, 1868; Wartmann, C. R. **66,** 155, 1868.
[2] Guye und Monasch, Ecl. El. **34,** 305, 1903.

Sie unterscheiden in großen, mittleren und kleinen Abständen bezüglich eine unruhige, normale und kritische Zone.

Ein Wechselstromlichtbogen von ca. 0,04 Ampère ist bei einer Elektrodendistanz von im allgemeinen über 10 mm unruhig; das eine der Bogenenden oder beide klettern an den Elektroden hinauf. Der Bogen wechselt beständig Gestalt und Stellung. Wird die Distanz verkleinert, so tritt der Bogen bei bestimmter Stromstärke bei einem für das betreffende Metall charakteristischen Abstand in eine ruhige Zone ein. Hierin hängt, wie es Heubach[1] für den Kohlenlichtbogen für Wechselstrom und niedrige Spannung gezeigt hat, die effektive Spannung in linearer Weise von der Bogenlänge ab. Als Guye und Monasch die Elektrodendistanz bis in die kritische Zone im allgemeinen etwas unterhalb 3 mm verringerten, erfolgte keine Abnahme der effektiven Spannung, wie sie erwartet hatten, sondern es traten sogar Funken in ihrem Voltmeter auf, so daß keine Ablesungen gemacht werden konnten. In der kritischen Zone ist die Aureole verschwunden. Statt des leichten Summens läßt der Bogen ein scharfes Knistern hören. Die kritische Zone tritt nicht auf bei kohlenstoffhaltigem Eisen oder wenn eine oder beide Elektroden Kohlen sind. Sie ist auch nicht bemerkbar bei Gleichstrom zwischen Metallen, während die normale und unruhige Zone dort gut unterscheidbar sind[2]. Wird ein Lichtbogen in der normalen Zone mit dem rotierenden Spiegel betrachtet, so findet man in der Mitte der halben Periode ein Leuchtmaximum und ein kontinuierliches Abfallen der Helligkeit nach beiden Seiten,

[1] J. Heubach, E. T. Z. **13,** 460, 1892.
[2] J. de Kowalski, C. R. **138,** 487, 1904.

während jede halbe Periode durch einen hellen Funken eröffnet wird. In der kritischen Zone beobachtet man eine kontinuierliche Aufeinanderfolge heller und dunkler Streifen. Es scheint also, daß die Entladungsform in der kritischen Zone eine diskontinuierliche sei.

7. Die Charakteristiken.

Der Widerstand eines Lichtbogens, wenn man von einem solchen in gewöhnlichem Sinne reden kann, ist variabel und u. a. abhängig von der Stromstärke, der Temperatur und dem Druck des Gases. Zudem entspricht einer stetigen Änderung irgend einer der den Wert des stationären Stromes bestimmenden Größen, an bestimmten Stellen eine unstetige Änderung im Werte des Stromes sowie der Spannung an den Enden der Gasstrecke. Solche Unstetigkeitspunkte sind oft mit einer gänzlichen Veränderung des Aussehens der Entladung verbunden. Aus dem Grunde wurde mit einigem Recht vielfach die Meinung geäußert, das sog. Ohm'sche Gesetz sei nicht auf Gasstrecken anzuwenden. Man ging dabei von der Annahme aus, der Quotient $\frac{e}{i} = w$ der sog. Widerstand müsse notwendigerweise in der Zeit konstant sein. Dies trifft in der Tat für die elektrischen Leiter annähernd zu, sofern wir dafür sorgen, daß durch Wärmeabgabe nach außen die Temperatur konstant erhalten bleibt. Jenes klassische Gesetz behält jedoch seine volle Gültigkeit sowohl für Leiter unter den verschiedensten Bedingungen als für Lichtbögen, sofern wir es nur als die Beziehung zwischen Stromstärke, Spannung und Widerstand während einem unendlich kurzen Zeitteilchen betrachten.

Um jedoch die Vorgänge im Verlaufe der Zeit dar-

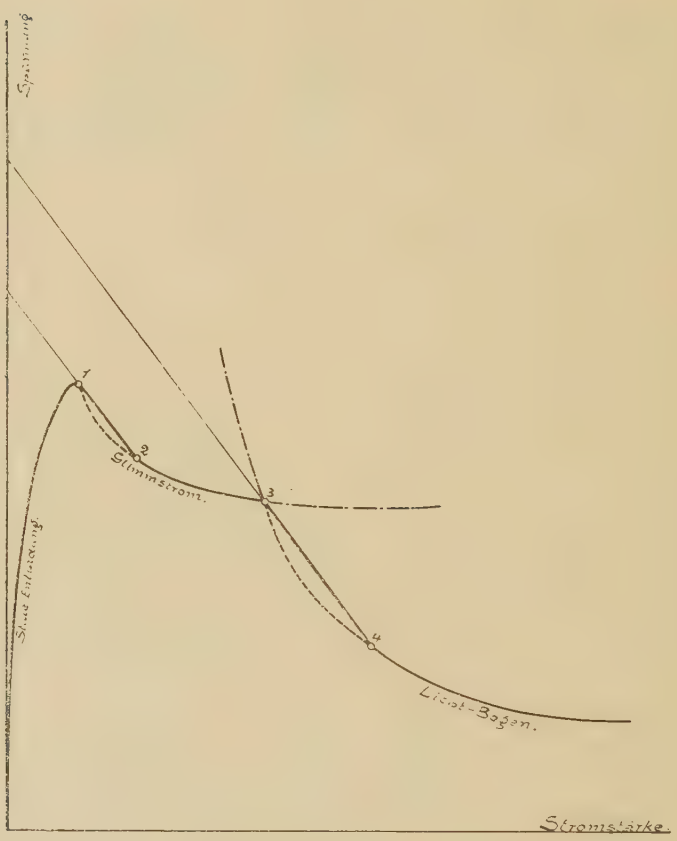
zustellen, sind wir genötigt, zu der Betrachtungsweise der charakteristischen Kurven überzugehen, wobei über die Natur der Funktion e = f (i) vorerst gar keine Annahmen gemacht werden. Der hohe Wert dieser Methode ist von der Technik schon seit langem erkannt worden. Sie wurde zum ersten Male von W. Kaufmann [1], H. Th. Simon [2] und H. Barkhausen auf die Lichtbogenvorgänge angewendet.

Ist eine elektromotorische Kraft E. an einen Leiterkreis vom Widerstande R, der überdies eine Gasstrecke enthalten soll, angelegt und werden nun die elektrodynamischen Verhältnisse durch Variieren entweder der elektromotorischen Kraft oder des Widerstandes oder beider zugleich, abgeändert, so werden zugehörige Stromstärke J und Spannung V der Gasstrecke successive bestimmt durch die Schnittpunkte der Widerstandslinie mit der charakteristischen Kurve. Wird etwa im besondern, bei konstantem Vorschaltwiderstand R, eine wachsende E.M.K. an die Gasstrecke gelegt, so schneidet die Widerstandslinie, indem sie parallel zu sich selbst verschoben wird, alle Punkte der Charakteristik von 0 bis 1. Es ist dies stille Entladung. Sobald die Widerstandslinie in 1. Tangente ist, springt die Entladungsform in den Glimmstrom nach 2 über, wächst dann kontinuierlich bis 3, wobei der Glimmstrom in den Lichtbogen nach 4 übergeht. Die durch schrittweise Änderung der Bedingungen erhaltene Kurve wird nach Simon die statische Charakteristik geheißen. Frau Ayrton hat gezeigt, daß derjenige Teil der Kurve,

[1] W. Kaufmann, Göttinger Nachr. 243, 1899; Ann. Ph. **2**, 158, 1900.

[2] H. Th. Simon, Ph. Z. **6**, 297, 1905.

[3] Barkhausen, l. c.



welcher dem Lichtbogen entspricht, in weiten Grenzen von der Beziehung:

$$V = \alpha + \beta . l + \frac{\gamma + \delta . l}{J}$$

beherrscht wird.

Den statischen Charakteristiken gegenüber stellt Simon [1] die dynamischen, die durch gleichzeitige Er-

[1] H. Th. Simon, Ph. Z. **6**, 297, 1905.

mittlung von Stromstärke und Spannung an einer Gasstrecke gewonnen werden, wenn eine mit der Zeit variable Betriebsspannung an dieselbe gelegt wird. Er hat auch zugleich gelehrt, wie nach zwei verschiedenen Methoden, entweder durch Ausmessung von Oscillogrammen oder vermittelst einer besondern von ihm angegebenen Schaltung mit der Braun'schen Röhre, die dynamischen Charakteristiken erhalten werden können. Die Charakteristik für wachsenden Strom liegt in der Regel höher als für fallenden, so daß für eine Wechselspannung die Kurve einer vollständigen Periode das Aussehen einer Hysteresisschleife besitzt.

Simon untersuchte in seiner Arbeit mit Hilfe der dynamischen Kurven den Kohlenlichtbogen in Abhängigkeit von den Dimensionen der Kohlen, der Kohlenart, dem Verschaltwiderstand, der Bogenlänge und der Periodenzahl. Er gab auch eine exakte Erklärung des Entladeverzuges, welcher ganz eingehend besonders von Warburg untersucht worden war und führte die spezifischen Unterschiede im Verhalten von Metall- und Kohlenlichtbogen auf einfache quantitative Faktoren zurück.

8. Stabiler und labiler Gleichgewichtszustand.

Zufolge der elektrodynamischen Verhältnisse in einer elektrischen Leitung mit einer Gasstrecke lassen sich, wie Kaufmann[1] gezeigt hat, Bedingungen angeben, die erfüllt sein müssen, wenn der Strom stationär sein soll. Wird angenommen, wie es Kaufmann getan hat, daß die E.M.K. der Stromquelle und die Bogenlänge konstant seien, während die Stromstärke und der

[1] W. Kaufmann, 4. Ann. Ph. **2**, 158, 1900.

äußere Widerstand variabel gedacht werden, so lauten die Beziehungen für den stabilen bezw. labilen Zustand:

$$\frac{dV}{dJ} + R \gtrless O \quad \begin{matrix} \text{stabil} \\ \text{labil} \end{matrix}$$

Es bedeuten: R der Vorschaltwiderstand

$R_{\S}$ der scheinbare Widerstand der Gasstrecke. Derselbe ist in jedem Augenblick durch die Gleichung definiert:

$$R_{\S} = \frac{V}{J} .$$

$W = J^2 . R_{\S}$ ist die dem Lichtbogen pro Sekunde zugeführte Energie in Watt.

Wird hingegen vorausgesetzt, wie es Granquist[1] getan hat, daß die Stromstärke konstant, aber die E. M. K. und die Bogenlänge variabel seien, so ist der stabile Zustand an die Bedingungen geknüpft:

$$E + J^2 . \frac{dR_{\S}}{dJ} > O ,$$

wohingegen der Übergang vom stabilen zum labilen Zustand durch die Gleichung:

$$E + J^2 . \frac{dR_{\S}}{dJ} = O \qquad \text{oder} \qquad E = 2 . \frac{W}{J} - \frac{dW}{dJ}$$

charakterisiert wird.

[1] G. Granquist, Nova acta Soc. Upsal. III. **2**, f. 2. p. 19, 1904.

9. Ventileffekt.

Im Jahre 1894 stellte Sahulka [1] zwischen einer Kohle- und einer Eisenelektrode einen Lichtbogen mit Wechselstrom her. Ein in die Leitung eingeschalteter Gleichstrommesser zeigte einen Strom an in der Richtung Kohle nach Metall, wenn die Richtung der negativen Elektronionen im Bogen als die Stromrichtung angesehen wird. Das Voltmeter, welches an die Elektroden gelegt wurde, gab jedoch einen ebensolchen Strom in entgegengesetzter Richtung an. Diese Versuche wurden von F. Gold [2] unter Anwendung eines Kupfervoltameters als Strommesser geprüft und bestätigt. Im Jahre 1896 unternahm L. Arons [3] ähnliche Versuche, wobei er auch feststellte, daß ein Wechselstromlichtbogen zwischen Eisenelektroden möglich ist, während er bei anderen Metallen bei denselben Bedingungen unmöglich ist. Ein Wechselstromlichtbogen zwischen zwei Elektroden von verschiedenen Wärmeleitungskoeffizienten muß sich nach den eingehenden Untersuchungen von Granquist [4] in den beiden Halbperioden verschieden verhalten. Wenn etwa die eine Elektrode Kohle, die andere Kupfer ist, so besteht der Bogen in jeder Halbperiode, wo die Kohle Anode ist, aus erhitztem Kohlegas, während gleichzeitig die Kathode große Wärmeleitfähigkeit besitzt. In der folgenden Halbperiode ist die Gasstrecke von Metalldampf erfüllt, während die Kathode Strombasis auf der schlecht leitenden Kohlenelektrode liegt.

[1] Sahulka, Sitz. B. Ak. Wien, **103,** 926, 1894.
[2] Franz Gold, Wien. Ber. **104,** 814, 1895.
[3] Leo Arons, Ann. Ph. **57,** 185, 1896.
[4] G. Granquist, Nov. act. Ups. III. **20,** f. 2, 1904.

Aus zahlreichen Messungen von Arons und Granquist l. c. geht hervor, daß der scheinbare Widerstand des Bogens $\left\{ \begin{matrix} C & + \\ Metall & - \end{matrix} \right.$ größer ist als für den Bogen $\left\{ \begin{matrix} M & + \\ C & \end{matrix} \right.$. Daraus geht hervor, daß für dieselbe elektromotorische Kraft das Gebiet für den möglichen Bogen $\left\{ \begin{matrix} M & + \\ C & - \end{matrix} \right.$ größer ist als für den Bogen $\left\{ \begin{matrix} C & + \\ M & - \end{matrix} \right.$. Mit andern Worten: es ist in der Stabilitätsgleichung:

$$E + J^2 . \frac{dR_s}{dJ} > O \quad \text{das Glied } J^2 . \frac{dR_s}{dJ}$$

unter sonst gleichen Bedingungen im ersteren Falle kleiner als im zweiten. Das heißt aber wiederum nichts anderes, als daß die Stabilitätsbedingung in der ersten Halbperiode während eines längern Zeitintervalls erfüllt ist als während des zweiten. Die Untersuchungen von Blondel [1], die er mit dem Oscillographen an Wechselstromlichtbogen unternommen hat, bestätigen in der Tat die gemachten Schlußfolgerungen. Wird der Abstand der Elektroden eines Kohlemetalllichtbogens vergrößert, so muß für die Halbperiode $\left\{ \begin{matrix} C & + \\ M & - \end{matrix} \right.$ ein Punkt eintreten, von wo an gerechnet die Stabilitätsbedingung während der betreffenden Halbperiode überhaupt nicht mehr erfüllt wird. Wir haben dann totale Ventilwirkung [2]. Wenn ein Kohle-Metallichtbogen längere Zeit unterhalten wird, so schlägt sich auf dem Metall eine Kohlenschicht nieder, wie Upson [3] gezeigt hat, und die Ventilwirkung wird infolge davon zu gewissem Teile verwischt.

[1] Blondel, C. R. **128,** 727, 1899.
[2] H. Th. Simon, Ph. Z. **6,** 297, 1905.
[3] Upson, Phil. Mag. **14,** 126, 1907.

Es ist nach den Versuchen von Granquist u. a. ohne weiteres anzunehmen, daß alle diejenigen Unsymmetrien zweier Elektroden, welche die Wärmeleitung beeinflussen, also spezifisches Leitungsvermögen, absichtlich bewirkte einseitige Erwärmung, Form der Elektroden u. s. f. Ventilwirkungen hervorrufen müssen.

II. TEIL.

Eigene Versuche.

1. Schaltung.

Die vorliegende Arbeit hatte zum Zweck, den Wechselstromlichtbogen bei hoher Spannung zwischen verschiedenartigen Metallelektroden mit dem Oscillographen zu untersuchen. Die hierzu benutzte Schaltung ist aus der Fig. 1 ersichtlich. Der Wechselstrom niederer Spannung wurde für den Transformator T entweder mit dem Ohm'schen Widerstand Ω oder mit der Selbstinduktionsspule L reguliert. Die eine sekundäre Klemme des Transformators war an Erde gelegt, während die andere mit einer Lichtbogenelektrode verbunden war. Der Bogenstrom verteilte sich dann bei N; der eine Teil ging durch n_1 und die erste Meßschleife im Oscillographen, der andere Teil durch n_2 an Erde. Um die Spannungskurve zu zeichnen, führte ein Nebenschluß zum Lichtbogen von der ersten Elektrode aus durch den Stromschlüssel S_1, den großen Widerstand W das Milliampermeter M. A. und die zweite Meßschleife an Erde. Den zur Aichung der Oscillogramme nötigen Gleichstrom lieferte die Akkumulatorenbatterie B von 40 Volt. Für die erste Meßschleife, welche den Strom

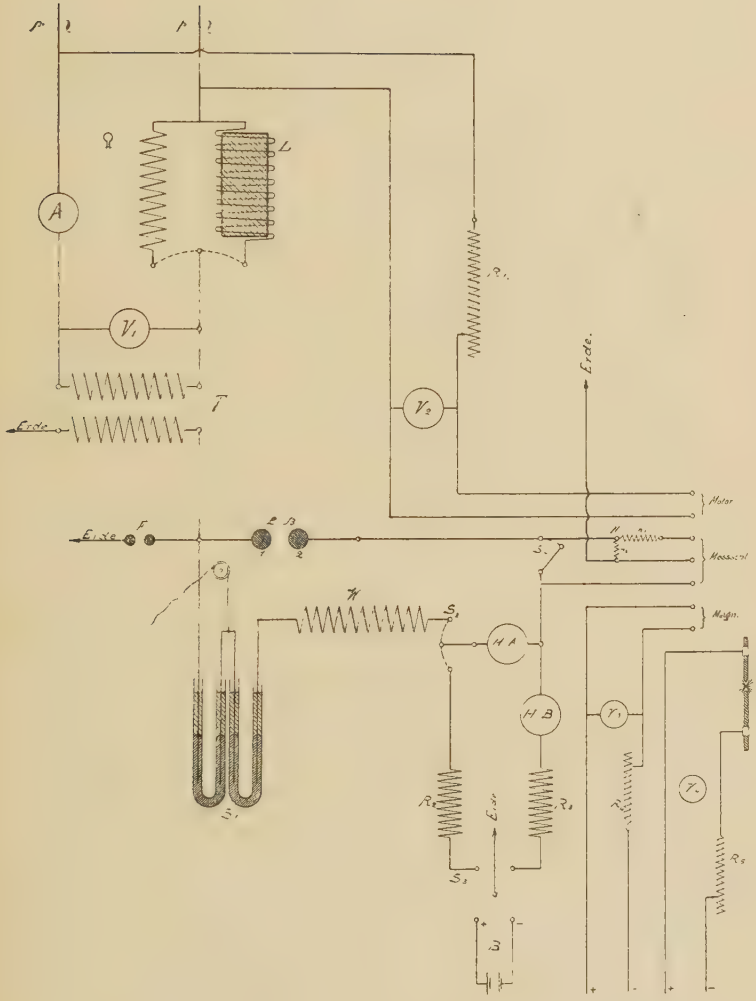


Fig. 1.

zeichnete, wurde der Aichungsstrom durch den Vorschaltwiderstand R_2 und das Milliampermeter M. A., für die zweite Schleife durch R_3 und das Milliampermeter H. B. geschickt. Der Gleichstrom, der für den Elektromagneten im Oscillographen erforderlich war, wurde der Laboratoriumsbatterie von 120 Volt entnommen. Mit Hilfe des Widerstandes R_4 wurde die Klemmenspannung beständig auf 110 Volt gehalten. Von den Klemmen der primären Wechselstromleitung aus führte ein Nebenschluß zum Transformator durch den Widerstand R_1 und den Motor im Oscillographen.

Der primäre Strom stammte aus dem Elektrizitätswerk in Hauterive. Er hatte eine mittlere Spannung von 150 Volt und eine verhältnismäßig sehr konstante von 50 wenig abweichende Periodenzahl.

Der Widerstand Ω bestand aus Manganindraht und war von der Firma Siemens und Halske für 35 Amper konstruiert worden. Der Wechselstromwiderstand L war eine aus ca. 250 Windungen bestehende, für den vorliegenden Zweck eigens gebaute Drosselspule. Die Windungen waren in zwei Lagen angeordnet; die einzelne Windung hatte einen Radius von 9 cm und die gesamte Höhe der Spule betrug 65 cm. Im Innern steckte ein Kern aus Eisendraht von der nämlichen Höhe und einem Durchmesser von 14,5 cm. Mittelst einer leicht zu manöverierenden Winde konnte der Kern so in der Spule bewegt werden, daß der Strom von 5 bis 70 Amper reguliert werden konnte.

Der Transformator war von Brown und Boveri in Baden für 70 Volt und 3,5 Kilowatt gebaut worden. Sein Transformationsverhältnis betrug $^{70}/_{50000}$. Übersetzungskoeffizient und Belastung waren jedoch schon öfters bis 70,000 Volt ausprobiert worden.

Der Stromschlüssel S bestand aus zwei U-förmig

gebogenen Röhren, die zum Teil mit Quecksilber gefüllt waren, das überdies mit Öl überschichtet war. Mittelst einer seidenen Schnur, die über eine isolierte, hängende Rolle führte, konnte das ∩-förmige Drahtstück auf und ab bewegt und der Kreis bequem geschlossen nnd geöffnet werden.

W stellte eine Reihe induktions- und capacitätsfreier Widerstände der Firma Siemens und Halske dar.

Das Milliampermeter M. A. war ein Präzisionsinstrument von Siems und Halske. Sein Widerstand war 1000 Ohm. Derselbe wurde stets dem ersten Widerstandskasten beigezählt. Es wurde mit einem kalibrierten Widerstand und einem von der technischen Reichsanstalt geprüften Westonelement nach der Kompensationsmethode von Poggendorf geaicht.

Das Milliampermeter H. B. war ein von Hartmann und Braun für Gleichstrom konstruiertes Präzisionsinstrument, das ebenfalls nach obiger Methode geaicht wurde.

Für das erste Galvanometer, welches den Bogenstrom zeichnete, bot der Stromverteiler N genügende Sicherheit. Die zulässige Stromstärke betrug 0,1 Amper (effektiv). Die Meßschleife der Spannung war äußerst empfindlich, weshalb besondere Vorsicht für sie nötig war. Wurde sie nicht gebraucht, so war sie durch die Stromschlüssel S_1 und S_5 ausgeschaltet. Sollte eine Beobachtung oder Aufnahme gemacht werden, so wurde, nachdem der Lichtbogen vorher gezündet, zuerst der Schlüssel S_1 geschlossen. Das Milliampermeter M. A. gab dann die Stromstärke an. Hierauf wurde erst durch den Schlüssel S_5 die Verbindung mit der Erde gelöst und der Strom durch das Galvanometer geschickt. Es war aber zu wiederholten Malen vorgekommen, daß der Lichtbogen erlosch, worauf der Strom im Nebenschluß

um ein Mehrfaches ausstieg und die Meßschleife und sogar das Milliampermeter gefährdete. Um dem abzuhelfen, wurde eine zweite Funkenstrecke F angewendet, welche mit der Erde direkt verbunden war. Jedesmal nun, wenn der Bogen erlosch, so schlug im gleichen Moment die Funkenstrecke durch und beide Galvanometer waren abgeschaltet. Die Einstellung der Funkenstrecke F konnte auch unter Strom mittelst einer Schraube aus Ebonit bequem vorgenommen werden. Die verwendeten Metallelektroden hatten alle dieselbe Form und Größe. Die Fig. 2 stellt einen axialen Schnitt dar, aus dem die Dimensionen entnommen werden können.

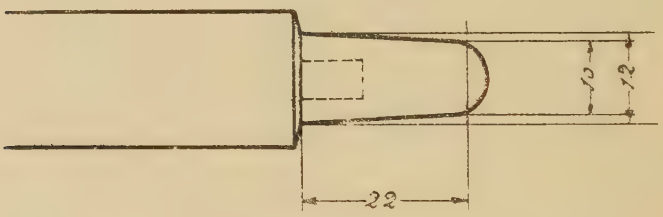


Fig. 2.

Sie waren an ca. 7 mm langen Schrauben auf massive, 15 mm dicke Messingbolzen aufgeschraubt, die ihrerseits in ca. 80 cm hohen Marmorsäulen fest eingekittet waren. Die Marmorsäulen waren auf einem Schlittenapparat befestigt. Eine Mikrometerschraube von 1 mm Ganghöhe, eine seitliche Millimeterteilung und ein Rad mit einer Teilung, welche $\frac{1}{100}$ mm Verschiebung entsprach, erlaubten die Abstände sehr genau zu bestimmen. Das ganze Gestell war sehr fest gebaut und diente sonst zur Bestimmung der dielektrischen Festigkeit der

Luft. Der Oscillograph war von Siemens und Halske nach dem von Prof. Blondel in Paris angegebenen Prinzip konstruiert. Er enthielt zwei Galvanometer nach Dreprez d'Arsonval, deren Spulen von je nur einer Schleife vertreten wurden. Zwischen den beiden parallellaufenden Drähten der Schleife war ein Spiegelchen befestigt von weniger als einem mm^2 Fläche. Das Trägheitsmoment der ganzen Schleife war äußerst gering; deren Gewicht betrug weniger als $\frac{1}{2}$ mmgr. Das kleine System hatte eine Eigenschwingungsdauer, resp. Eigenschwingungszahl von über 6000 volle Perioden pro Sekunde, so daß ein Wechselstrom von 50 Perioden mit der wünschbaren Genauigkeit aufgezeichnet wurde. Das Licht einer Bogenlampe wurde vermittelst eines besondern optischen Systems auf die Galvanometerspiegel geworfen und von hier aus entweder in den Beobachtungsapparat oder auf einen Hebeldruck auf die photographische rotierende Trommel reflektiert. Die letztere und der Beobachtungsapparat saßen auf der Achse eines kleinen Synchronmotors, der von Hand vermittelst einer Antriebsvorrichtung auf Touren gebracht wurde.

Da es schwierig war, die beiden Galvanometer so zu justieren, daß die Nullpunkte ganz genau auf einander fielen und sie sich, auch wenn dies einmal erreicht war, mit der Zeit doch wieder in geringem Maße verschoben, so daß keine eindeutige und scharfe Null-Linie erhalten werden konnte, so wurden die Spiegel mit Absicht verstellt. Es erhielt dann jede Kurve ihre eigene Null-Linie und die Ausmessungen konnten bedeutend exakter ausgeführt werden.

Die vorliegende Schaltung ist zur Ermittlung der dynamischen Charakteristik des Wechselstromlichtbogens niederer Spannung mit Erfolg von H. Th. Simon

benützt worden. Es schien jedoch aus folgenden Gründen anfänglich ein berechtigter Zweifel an ihrer Brauchbarkeit beim Hochspannungslichtbogen zu bestehen. Die Spannungsschleife im Oscillographen braucht um eine Elungation von 3–4 cm auf dem Papier der photographischen Trommel zu zeichnen ca. 35–40 Milliamper. Der größte Stromverbrauch durch dieselbe findet im Momente der Zündung des Lichtbogens statt. Da nun die Spannungsschleife dem Lichtbogen parallel geschaltet ist, entnimmt dieselbe dem Bogen die größte Stromstärke gerade in dem Augenblick, in welchem die Zündung eingeleitet werden sollte, d. h., die parallel geschaltete Spannungsschleife wird die Zündung verzögern. Dies hat zur Folge, daß die Zeitdauer zwischen zwei Halbperioden, worin der Lichtbogen nicht brennt, verlängert wird. Es haben dann die Elektroden Zeit, sich stärker abzukühlen als sonst, und die Zündspitzen müssen höhere werden. Es wird also hierdurch der Bogen wenigstens im ersten Moment der Zündung deformiert werden müssen.

Um ein Urteil über den Umfang dieser Wirkung bilden zu können, ist ein Vergleich zwischen dem Bogenstrom und dem durch die Widerstände fließenden Strom angestellt worden. In Fig. 3 gibt die Kurve 1. den Stromverlauf in Bogen an, während die Kurve 2. den gesamten vom Transformator gelieferten Strom darstellt. Es zeigt sich, daß der Stromverbrauch der Spannungsschleife in der Tat im Momente der Zündung ein bedeutender ist. Es läßt dies ganz sicher auf eine meßbare Verzögerung der Zündung schließen [1]. Da der besagte Einfluß beträchtlich aber ebenso unver-

[1] Siehe Fig. 3, Seite 39 dieser Arbeit.

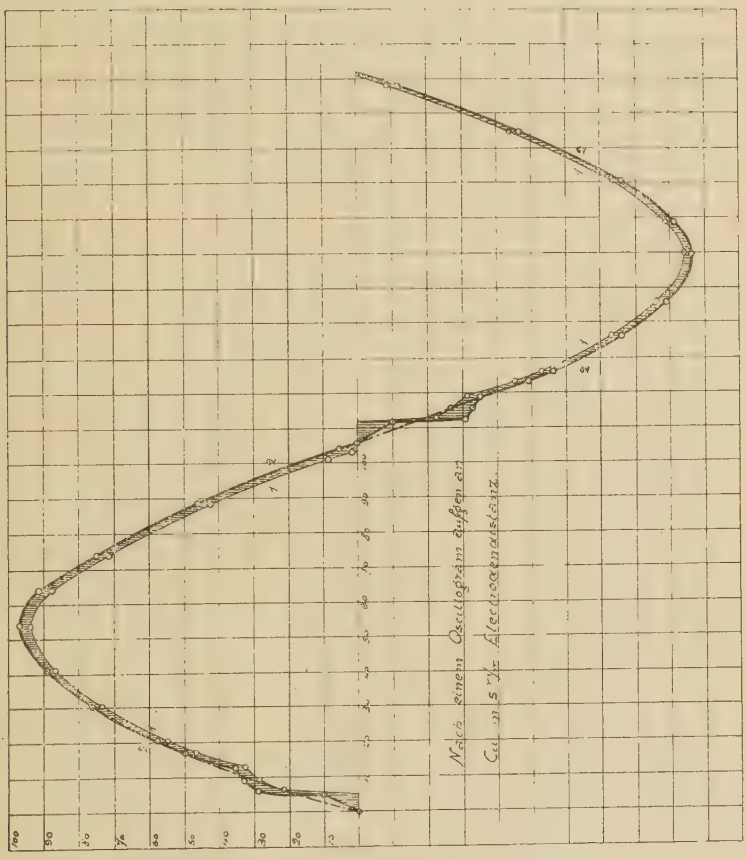

Nach einem Oscillogram aufgen an
Cu in 5 m/m Electrodendistanz.

Fig. 3.

meidlich ist, so wurde im Verlaufe der ganzen Arbeit darauf geachtet:

1. Daß den Spannungswerten im Moment der Zündung, sagen wir den Zündspitzen, nicht absoluter, sondern bloß relativer Wert beigelegt wurde und

2. daß nur solche Oscillogramme mit einander verglichen wurden, welche bei immer gleichbleibendem Widerstand vor der Spannungsschleife, 262,000 Ohm, aufgenommen worden waren.

2. Die dynamische Charakteristik in Abhängigkeit vom Elektrodenabstand.

Eine erste Versuchsreihe war dahin gerichtet, die Änderungen der dynamischen Charakteristik des Lichtbogens bei wachsendem Elektrodenabstand klar zu legen. Für die zwei Metalle Zink und Silber sind die Resultate in den Figuren 4 und 5 dargestellt. Mit zunehmendem Elektrodenabstand rücken die Charakteristiken zu höheren Spannungswerten. Während bei kleinem Abstand die Spitze der Schleife beinahe parallel zur Stromachse gerichtet ist, nimmt sie bei größerem Abstand eine geneigtere Lage an. Die Zündspannungen wachsen immer schneller, während die Hysteresisflächen im Gebiete aller Stromwerte beständig an Breite zunehmen. Eine präzise Vorstellung der Vorgänge im Lichtbogen wird uns diese Tatsachen verständlich machen. Wäre der Stromwechsel ein unendlich langsamer, so würde die aufsteigende mit der absteigenden Charakteristik zusammenfallen. Genauer noch, zwei Punkte der beiden Kurvenäste beliebig herausgegriffen, aber durch gleiche Stromwerte gekennzeichnet, würden dann identische Zustände darstellen. Die bei einem bestimmten Lichtbogenzustand in der Funkenstrecke ver-

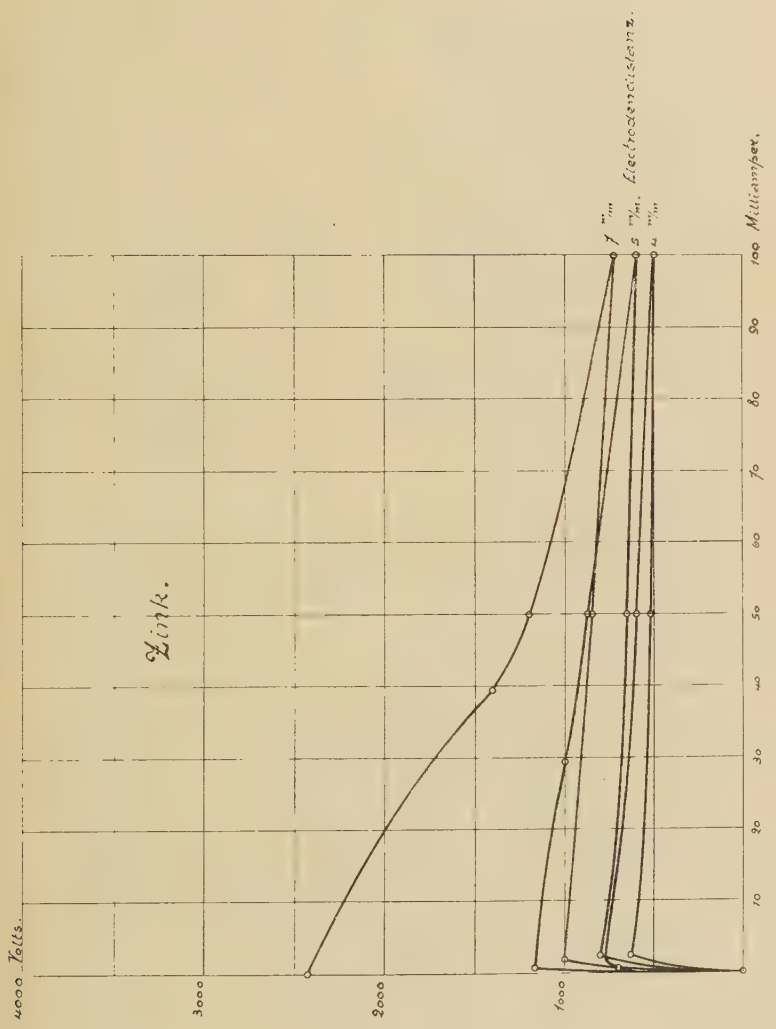

4000 Volts.
3000
2000
1000
Link.
7 mm.
5 mm.
4 mm.
Electrodenentfernung.
100 Milliampere.
90
80
70
60
50
40
30
20
10

Fig. 4.

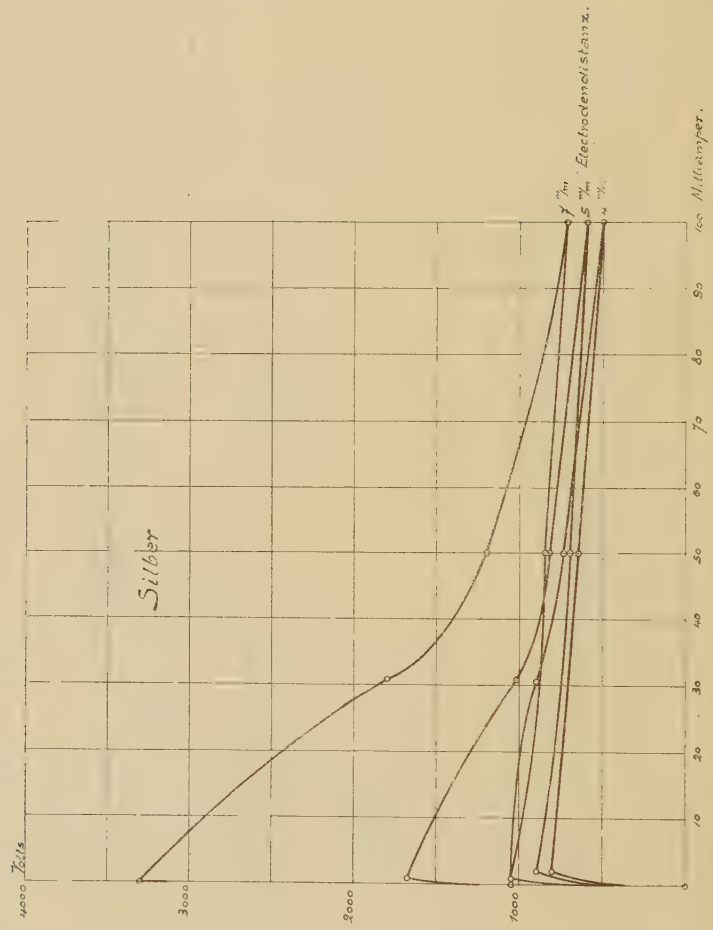

Silber
Volts
4000
3000
2000
1000
Milliampère.
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
Electrodendistanz.

Fig. 5.

brauchte Energie würde dann dazu verwendet, erstens, um die durch Leitung an die Elektroden, durch Konvektion an die umgebende Luft und durch Strahlung in den angrenzenden Raum abgegebene Wärme zu kompensieren und zweitens, um die durch Molisation fortwährend sich vermindernde Leitfähigkeit der Luftstrecke aufrecht zu erhalten. Ist nun aber der Lichtbogen raschen Stromwechseln unterworfen, so hat bei wachsendem Strom die momentane Bogenenergie nicht nur die dem stationären Zustande entsprechenden Verluste zu kompensieren, sondern obendrein die für den verstärkten Bogen notwendig gewordenen Existenzbedingungen erst neu zu schaffen. Der abnehmende Bogenstrom aber bedarf zur Aufrechterhaltung seiner Existenzbedingungen relativ weniger Energie als bei entsprechenden Stromwerten im stationären Zustand, da in jedem Moment die Leitungsbedingungen bessere sind, als sie im allernächsten Augenblick zu sein brauchen. Es handelt sich beim Wechselstromlichtbogen um drei alternierende Größen, also drei wellenartige Kurven: der Spannung des Stromes und des Zustandes des Bogens. Dieser Zustand ist charakteristisch durch die Beschaffenheit der Elektroden und der Gasstrecke. Letzterer wird selbst wiederum von mehreren Faktoren bedingt, wie etwa der Jonenverteilung in der Gasstrecke, der Größe und der Temperatur der Kraterflächen. Bei unendlich langsam wechselndem Strom wäre der Bogenzustand durch die Stromstärke bestimmt. Die Spannung aber wäre durch die statische Charakteristik festgelegt. Rasche Stromänderungen hätten dann aber zur Folge, daß die drei Kurven, bezogen auf den statischen Zustand, nicht Phasenverschiebungen, aber in gewissen Partien, je nach der Größe von $\frac{di}{dt}$, Defor-

mationen erleiden. Hierbei ist nun vollkommen offen gelassen, ob etwa im besonderen die Kurve des Lichtbogenzustandes dem Strome augenblicklich folge oder nicht. Reich u. a. loc. c. haben diese Frage wenigstens in Bezug auf die Jonenverteilung im bejahenden Sinne beantwortet, während sie feststellten, daß die Änderungen der Kraterflächen hinter den Stromschwankungen zurückbleiben. So viel mir bekannt ist, sind jedoch alle diesbezüglichen Angaben auf Versuche begründet, welche an Bögen hoher Stromstärke und geringen Elektrodenabstandes angeführt worden waren. Im besondern ist die Bedeutung der Krater und des Elektrodenmaterials durch die wichtigen Untersuchungen von G. Granquist l. c. erwiesen worden. Es scheint jedoch angezeigt, diese Verhältnisse für Bögen sehr kleiner Stromstärke und verhältnismäßig großen Elektrodenabstandes noch näher zu prüfen. Ein Teil der nachfolgenden Untersuchungen wird nun zeigen, daß bei Lichtbögen letzterer Art der Einfluß der Elektroden relativ zurücktritt, während auch die Gasstrecke an Bedeutung gewinnt. Bei großen Stromstärken, wo der Zustand des Lichtbogens vorzugsweise von der Größe und Temperatur der Kraterflächen beherrscht wird, verhalten sich die letzteren wie ein System großen Trägheitsmomentes. Wenn aber bei kleinen Strömen und langen Bögen die Gasstrecke an Bedeutung gewinnt, so ist zu erwarten, daß auch sie sich einem solchen System vergleichbar verhalten muß. Das heißt aber nichts anderes, als daß dort auch die Jonenverteilung, überhaupt der Zustand der Gasstrecke bei raschen Stromänderungen einer schweren Masse ähnlich, hinter den statischen Werten zurückbleibt. Versuche mit sehr langen Bögen, welche in dieser Arbeit mitgeteilt sind, machen diese Annahme in der Tat notwendig.

Die vorliegenden Figuren zeigen, daß die Spannungskurve in Bezug auf die Stromkurve deformiert wird. Dies hat zur Folge, daß auch die Funktionen:

$$f = \frac{e}{i} = \frac{f(i)}{i} \qquad \text{und} \qquad \lambda = \frac{i}{e} = \frac{i}{f(i)}$$

die man oft mit dem Namen Widerstand und Leitfähigkeit belegt hat, ebenfalls von der Änderungsgeschwindigkeit der Stromstärke beeinflußt werden.

3. Das Elektrodenmaterial.

Um den Einfluß des Elektrodenmaterials auf den Lichtbogen leicht überblicken zu können, wurden oscillographische Aufnahmen an Zink, Silber, Nickel, Gold, Aluminium und Blei vorgenommen. Es wurden alle anderweitigen Größen wie primäre Stromstärke, Abstand der Elektroden und Widerstand vor der Spannungsschleife konstant gehalten. Die Elektrodendistanz betrug 5 mm. Die Zündspitzen der verschiedenen Metalle sind ganz verschieden. Am höchsten liegt die Zündspannung für Blei, am niedrigsten für Aluminium. Wir lenken die Aufmerksamkeit vorerst aber auf die bereits gezündeten Bögen. Die Hysteresisspitzen der Metalle Zink, Silber, Nickel, Gold (und Aluminium) weichen in ihren Spannungswerten nicht mehr als 5 % von einander ab, sofern von Aluminium vorerst abgesehen wird, dessen Spannungswert um 15 % tiefer liegt. Ja die in der Methode begründeten Schwierigkeiten und Fehlerquellen bieten keine Sicherheit, daß die Umkehrpunkte wenigstens der ersten vier Metalle bezogen auf gleiche Stromwerte nicht vollständig zusammenfallen. Die vorliegenden Tatsachen lassen sich nicht anders deuten, als daß die folgenden Annahmen gemacht

werden. Das Elektrodenmaterial hat bei diesen geringen Stromstärken, bis 0,1 Amper maximal, bei Lichtbögen mit Elektroden aus Zink, Silber, Nickel und Gold einen geringen Einfluß auf die statischen Spannungswerte der Bögen. Dies ließe sich nur denken, wenn hierbei die Elektroden nur zu ganz geringen Teilen verdampfen würden. Die Gasstrecke würde dann sehr wenig Metalldampf enthalten. Die Lichtbogenkrater hätten dann Temperaturen, die niedriger wären als die Siedetemperaturen der entsprechenden Metalle.

Im Gegensatz zu jenen vier Metallen liegt die Hysteresisspitze für Blei um volle 40 % tiefer als dort, trotzdem die Zündspannung die höchste ist. Die Charakteristik steigt also mit wachsendem Strom viel stärker abwärts als bei allen andern Metallen. Es ist anzunehmen, daß dies durch ein intensiveres Verdampfen der Bleielektroden bewirkt wird. Die Flächenräume der verschiedenen Hysteresisschleifen können weder aus den Atomgewichten noch aus den Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten der Metalle erklärt werden. Dies allein macht es wahrscheinlich, daß bei diesen Stromstärken das Elektrodenmaterial, besonders etwa dessen Wärmeleitfähigkeit nicht die dominierende Bedeutung haben kann wie bei Lichtbögen von mehreren Amper. Es scheint jedoch eine kaum zu mißdeutende Übereinstimmung zwischen jenen Flächenräumen und den Schmelzpunkten der einzelnen Metalle zu bestehen. In der beigegebenen Tabelle sind unter Sm die Schmelzpunkte, unter $\frac{1}{T_0 + Sm}$ die reziproken Werte der absoluten Schmelztemperaturen und unter F. S. die Flächeninhalte der Hysteresisspitzen für alle Metalle vergleichbar in einem willkürlichen Maße angegeben. Die Werte wurden mit einem Amsler'schen Integraphen erhalten

und wegen den etwas ungleichen maximalen Stromstärken mit Korrekturen versehen.

Tabelle I.

Metall	Sm.	F. S.	$\frac{1}{To + Sm} \cdot 10^3$
Blei . . .	325	1,32	1,67
Zink . . .	412	1,28	1,47
Alum. . . .	660	**0,78**	1,07
Silber . . .	970	0,81	0,805
Gold . . .	1060	0,25	0,75
Nickel . . .	1476	0,1	0,57

Die Kolonne der Flächenräume stimmt mit Ausnahme von Aluminium vollkommen mit derjenigen der reziproken Werte der absoluten Schmelztemperaturen überein. Die Ausnahme des Aluminiums darf aber nicht befremden, wenn wir bedenken, daß gerade hierbei die Elektroden mit einer dicken Oxydkruste belegt sind, welche selbst eine hohe Schmelztemperatur hat. Die Abweichung des Wertes 0,78 für Aluminium geht nun aber in der Richtung, wie wenn sich das Metall verhalten hätte wie eines mit höherem Schmelzpunkte.

Die früheren Untersuchungen haben gezeigt, daß die Charakteristiken der Metalle Zn, Ag, Ni und Au im Gebiete von 0,1 Amper maximaler Stromstärke sehr wenig von einander abweichen. Dies legt die Vermutung nahe, daß für den gezündeten, also auch für den statischen Bogen die Bedeutung der Eigenschaften der Elektroden keine so hervorragende wie bei großen Stromstärken sein könne. Nach den Versuchen von Richardson ist das intensive Ausströmen der negativen Elektronionen

an bestimmte, dem betreffenden Metall charakteristische Bedingungen geknüpft, was notwendigerweise ebenso jedem Metall eigenartige charakteristische Kurven erzeugen muß. Dies ist also der Fall beim gewöhnlichen Lichtbogen. Denn hierbei ist bei verschiedenen Elektroden die Luftstrecke mit verschiedenen Metalldämpfen erfüllt und die Größe und Temperatur der Krater ist von der Natur und der Wärmeleitfähigkeit der Elektroden bedingt. Demgegenüber scheinen aber die charakteristischen Kurven jener vier Metalle mit wachsendem Strom zusammen laufen zu wollen. Dies nötigt uns zur Ansicht, daß es sich dabei um eine vom Lichtbogen abweichende Entladungsform handle. Besonders wäre, wenn es sich um gewöhnlichen Lichtbogen handeln würde, zu erwarten, daß bei verdoppelter Stromstärke die Spannung bedeutend sinken müßte. Die Oscillogramme 6 und 7 zeigen jedoch, daß wenn im Gegenteil die Stromstärke in Verhältnissen wie $1 : {}^{3}/_{2} : 2$ abgeändert werden, die minimalen Spannungswerte sich nicht meßbar verschieben.

Die Kurven wurden so erhalten, daß alle elektrodynamischen Verhältnisse beibehalten wurden, während die primäre Stromintensität auf drei verschiedene Werte gebracht wurde. Die Spannungskurven mit den hohen Zündwerten gehören zu den geringeren Stromstärken. Fig. 6 wurde mittelst Ohm'schen, Fig. 7 mittelst Selbstinduktionswiderstand im pr. Schließungskreis erhalten. Beide Oscillogramme beziehen sich auf Kupfer. Die vorliegenden Versuche zeigen, daß die Elektrodenspannung für statische Bögen zwischen Metallen wie Cu, Zn, Ag, Ni und Au bis zu Stromstärken von 0,12 Amper sehr wenig mit der Intensität des Stromes variert und also im wesentlichen nur von der Länge der Luftstrecke bedingt ist.

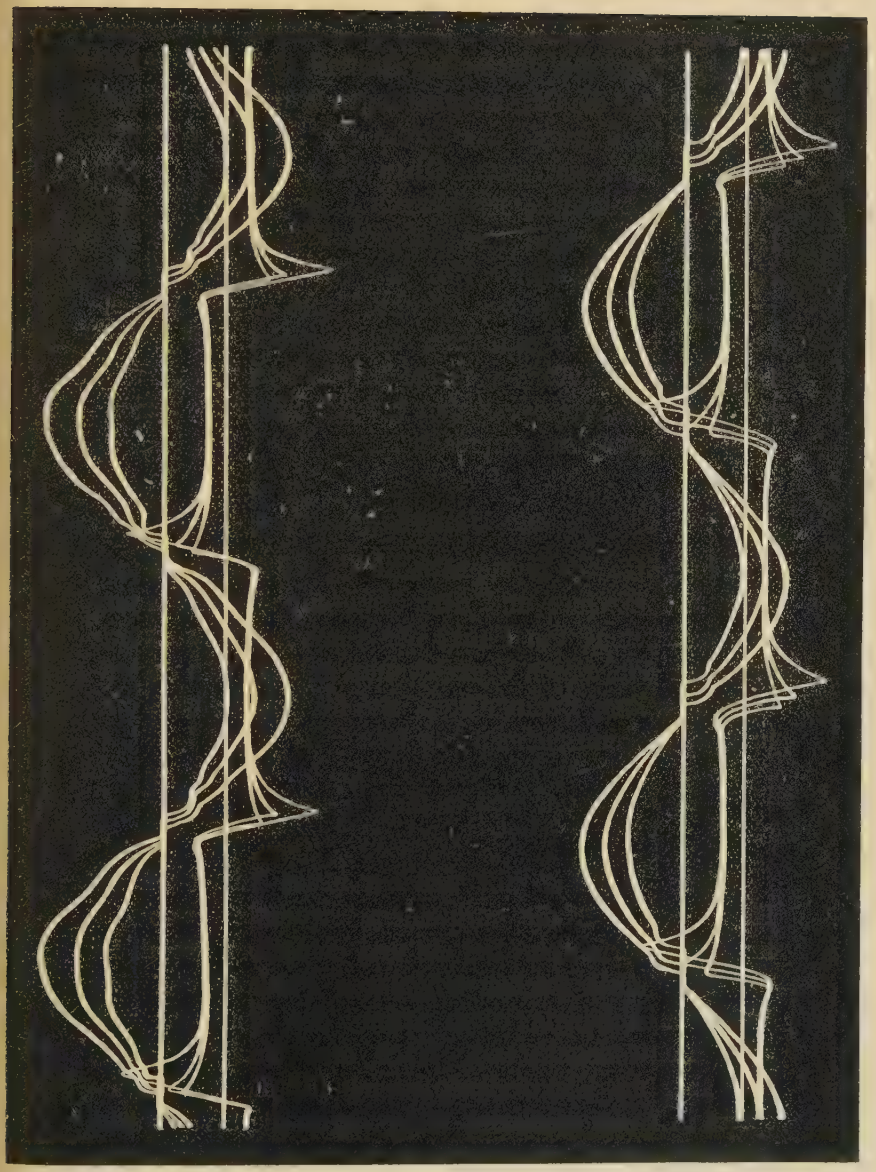


Fig. 6.

Fig. 7.

Die beiden Figuren zeigen gleichzeitig in prachtvollster Weise den glättenden Einfluß, den eine Selbstinduktion auf die Oberschwingungen des Netzes ausübt.

Bei Fig. 6 wurde der Strom für den verwendeten Transformator mit einem Ohm'schen, bei Fig. 7 mit einem Selbstinduktionswiderstand abgedrosselt. Im letzteren Falle sind alle höheren Harmonischen des Netzes verschwunden. Nur am Anfang jeder Halbperiode im Moment der Zündung sind noch Unregelmäßigkeiten übrig geblieben. Es sind dieselben jedoch nicht als dem Netzstrom charakteristisch zu betrachten; sie sind vielmehr durch den bei der Zündung auftretenden Extrastrom verursacht.

4. Die Umkehrpunkte.

Die Spitze der Hysteresisschleife, welche dem Maximum des Stromes und dem Minimum der Spannung entspricht, muß ein Punkt der statischen Charakteristik sein. Für diesen Umkehrpunkt gelten einen Augenblick dieselben Bedingungen, welche den Gleichstromlichtbogen kennzeichnen; es ist:

$$\frac{di}{dt} = o \quad \text{und auch} \quad \frac{dV}{dt} = o \quad .$$

Diese Tatsache gibt uns ein neues Mittel an die Hand, um über die vorhandene Stromart etwas Genaueres zu erfahren. Bei ein und demselben Metall ist die Lage eines solchen singulären Punktes von drei Variablen abhängig: vom Strom, der Spannung und dem Elektrodenabstand. Nach dem Vorigen ändert sich aber die Elektrodenspannung für die Hysteresisspitze in kaum meßbarer Weise, wenn die Stromstärke verdoppelt wird. Wenn es nun also etwa gelingen sollte,

für ein bestimmtes Metall und für eine Reihe von Elektrodendistanzen bei auch nur annähernd gleicher maximaler Stromstärke jene singulären Punkte zu erhalten, so müßte sich uns die Abhängigkeit der Spannung von der Elektrodendistanz für den statischen Bogen und die betreffende Stromintensität ergeben. Es wurden nun eine Reihe solcher Aufnahmen vorgenommen an Zink, Silber, Gold und teilweise auch Nickel, Kupfer, Aluminium und Blei. Die maximale Stromstärke lag bei den meisten Versuchen zwischen 0,09 und 0,1 Amper. Die Resultate sind in der Tabelle II zusammengestellt.

Tabelle II.

Elektroden-distanz	Elektrodenspannung						
	Zu	Ag	Cu	Au	Ni	Al	Pb
0,3		345		345			
0,5	350	355					
1	385	380	380			(250)	[60]
2	440	448					
3	505	509		500			[210]
4		570		562			
5	615	610	606	607	610	(606)	[390]
6							
7	745	743				(740)	[550]
8			800				
9		860					

Aus der Tabelle ersehen wir, daß die Spannungswerte aller Metalle mit Ausnahme von Al und Pb einander vollkommen entsprechen. Werden die Punkte in einem rechtwinkeligen Achsensystem in Abhängigkeit

von Spannung und Elektrodenabstand aufgetragen, so ergibt sich eine gerade Linie. Die Gleichung dieser Geraden ist :

$$V = 320 + 60\,d \quad ,$$

wobei V die Elektrodenspannung in Volt und d die Elektrodendistanz bedeutet. Die Elektrodenspannung für den Gleichstromlichtbogen von 0,09–0,1 Amper und die Elektrodendistanz $d = 0$ ist also 320 Volt. Mit jedem Millimeter Abstand steigt die Spannung um 60 Volt. Bei Aluminium zeigen einzelne Halbperioden diese Gesetzmäßigkeiten auch ; andere aber weisen jedenfalls, der starken Oxydschichten auf den Elektroden wegen, tiefere Spannungswerte auf. Blei gehorcht der obigen linearen Gleichung durchwegs nicht. Es sind die minimalen Spannungswerte überdies stark von der Stromstärke abhängig.

5. Die Entladungsform.

Alle bisherigen Versuche haben darauf hingedeutet, daß bei Wechselstromlichtbogen von 0,1 Amper maximaler Stromstärke zwischen den Metallen Zn, Ag, Cu, Au, Ni und zum Teil wohl auch Al keine Verdampfung der Elektroden wie bei gewöhnlichem Lichtbogen vorkommt, die Kraterflachen Temperaturen aufweisen, welche unter der Siedetemperatur der entsprechenden Metalle liegen, die Bedeutung des Elektrodenmaterials im Vergleich zur Gasstrecke zurücktritt und die Spannung deshalb vornehmlich nur von der Länge des jonisierten Gasraumes bestimmt wird. Die Frage nach der Lichtbogennatur der vorliegenden Entladungsform kann entschieden werden durch einen Vergleich jener Umkehrpunkte oder Hysteresisspitzen mit den von Guye und Zébrikoff, l. c. veröffentlichten, nach dem Vor-

gange von Frau Ayrton für mehrere Metalle bestimmten Gleichungen der statischen Lichtbogencharakteristiken. In der beigegebenen Tabelle III sind für Ströme von 0,1 Amper und verschiedene Elektrodenabstände die aus der Guye'schen Formel berechneten den aus

Tabelle III.

Abstand m/m	Oscillogramme	Guye und Zébrikoff
0,3	345	176
0,5	355	225
1	380	322
2	448	515
3	509	709
4	570	903
5	610	1096
7	743	1484
9	860	1744

unseren Oscillogrammen ausgemessenen Spannungswerten gegenübergestellt. Die Tabelle bezieht sich auf Silber. Während die Zahlenreihe, welche aus den Oscillogrammen gefunden ist der liniaren Gleichung

$$V = 320 + 60 . d$$

entspricht, läßt sich die Kolonne der aus der Guye'schen Formel berechneten Werte durch die Gleichung

$$V = 127{,}8 + 193{,}74 . d$$

umschreiben. Bis zu 1,5 mm Elektrodenabstand sind die Spannungswerte der Guye'schen Formel tiefer als die unserigen, nachher tritt das Gegenteil ein, so daß bei etwa 9 mm seine Spannungswerte das Doppelte der

unserigen ausmachen. Aber auch ohne diesen direkten Vergleich hätte vorausgesagt werden können, daß unsere Werte der Guye'schen Formel nicht gehorchen können. Wir haben in einem vorigen Versuche direkt gezeigt, daß die Spannung eine ganz geringe Abhängigkeit von der Stromstärke aufweist. In der Guye'schen Formel

$$V = 14{,}19 + 3{,}64 . d + \frac{19{,}01 . d + 11{,}36}{i}$$

aber ist gerade bei einer kleinen Stromstärke von 0,1 Amper eine ganz kleine Änderung der Intensität mit einem bedeutenden Einfluß auf die Spannung verbunden. Es darf nun allerdings die Bemerkung nicht unterlassen werden, daß die soeben vorgenommene Extrapolation der besprochenen Formel bis ins Gebiet kleinster Stromstärken, wie umfassend die Arbeiten, welche die genannten Physiker zur Ermittlung der Konstanten unternommen haben, gewesen sein mögen, nicht in dem Sinne zulässig ist, daß man noch Wert auf die dritte oder gar vierte Stelle legte. Aber die Abweichungen sind so bedeutend, daß eine Identität der zu Grunde liegenden Phänomene ausgeschlossen ist Somit ist bewiesen, daß der sogenannte hochgespannte Lichtbogen bis zu 0,1 Amper und darüber hinaus zwischen schwer verdampfbaren Elektroden wie Zn, Ag, Cu, Au, Ni (Al) kein eigentlicher Lichtbogen ist. Es kommt dabei kein intensives Verdampfen der Elektroden vor. Die Bedeutung der Elektroden tritt deshalb auf Kosten der Gasstrecke zurück. Die statische und somit auch die dynamische Charakteristik verläuft zur Stromachse weit flacher, als die Ayrton'sche Formel erfordern würde. Es muß deshalb dieser Bogen noch den Charakter des Glimmstromes haben. Bei Blei jedoch fällt die

Charakteristik mit wachsendem Strome in unvergleichlich stärkerem Maße. Auch das Aussehen des Bogens läßt auf ein intensives Verdampfen schließen.

Die niedrige Siedetemperatur 950° Cels. des Zinks ließe erwarten, daß auch dieses Metall intensiv zu verdampfen beginne, während ja Blei mit einem Siedepunkt von 1450° dies bereits tut. Es ist aber zu bedenken, daß der einmal aufgetretene Bleilichtbogen durch die sehr geringe Wärmeleitfähigkeit des Bleis in Vergleich zu der des Zinks begünstigt wird.

	Siedepunkt	Wärmeleitf. K . 10^3
Blei . . .	1450	81
Zink . . .	950	265

Im Jahre 1903 veröffentlichten Guye und Monasch Versuche, welche sie aus Wechselstromlichtbögen der effektiven Stromstärken 0,03, 0,04 und 0,05 Amper zwischen den Metallen Mg, Fe, Ni, Cu, Ag, Cd, Pt und Au vorgenommen hatten. Sie fanden, daß die Effektivwerte der Spannung in Beziehung stehen zu den Atomgewichten der Metalle, aus welchen die Elektroden bestanden. Nur das Cadmium machte eine unerwartete Ausnahme. Seine Spannungswerte lagen durchwegs verhältnismäßig tief.

Diese Tatsache steht in vollkommener Übereinstimmung mit unseren Beobachtungen und Schlußfolgerungen, nämlich:

1. Auch bei Guye und Monasch handelte es sich nicht um eigentliche Lichtbögen, sondern um Glimmströme.

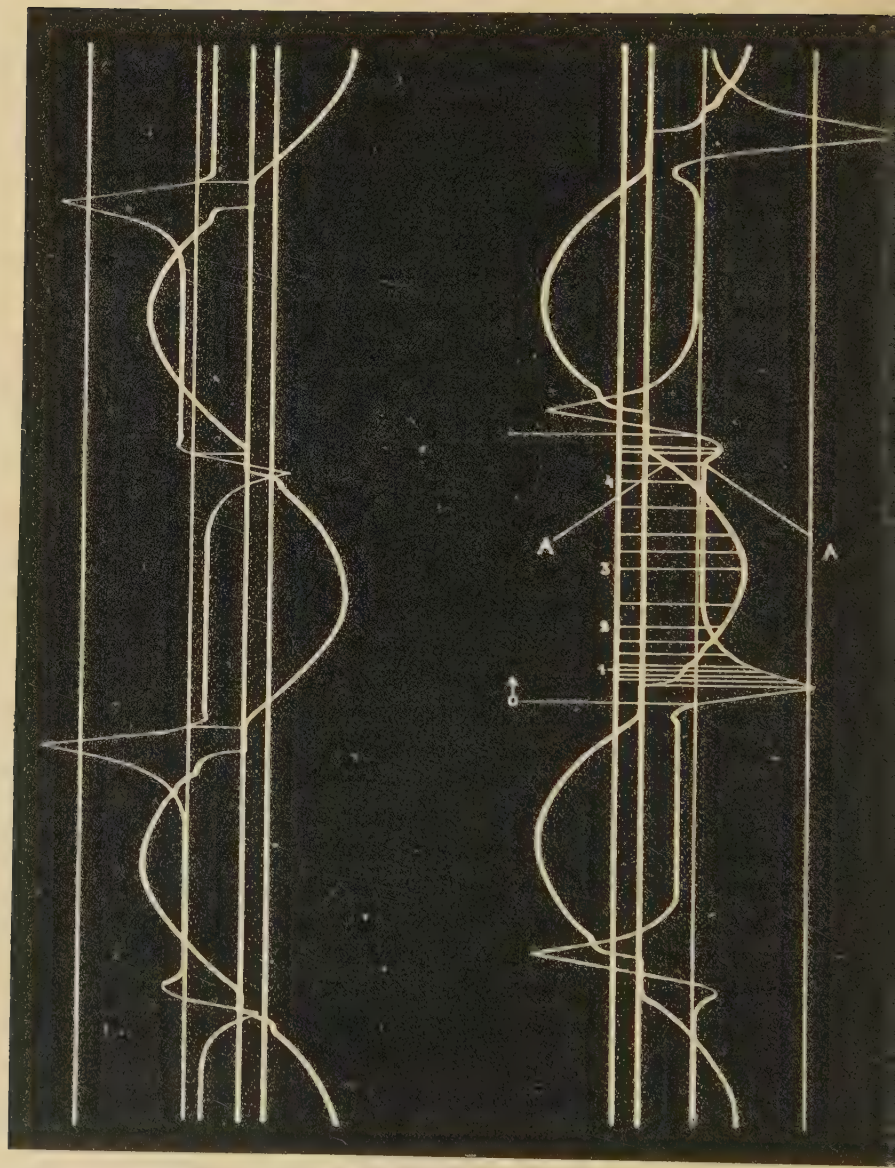


Fig. 8.

Fig. 9.

2. Nur Cd. zeigte infolge seines niedrigen Siedepunktes 772 C. ein ähnliches Verhalten wie bei uns das Blei, indem die niedrige effektive Stromstärke von 0,03 bis 0,05 Amper genügte, um die Lichtbogenform aufrecht zu erhalten.

6. Der kritische Punkt.

Unter den sieben untersuchten Metallen zeigt vorerst nur Blei die Lichtbogenentladung. Sie wurde begünstigt durch die schlechte Wärmeleitfähigkeit einerseits und die niedrige Siedetemperatur anderseits. Wir hatten früher schon erwartet, daß auch Zink, des niedrigen Siedepunktes wegen, sich in seiner Entladungsform auf der Lichtbogencharakteristik bewegen sollte. Seine Hysteresisspitzen gehorchten jedoch vollkommen, wie die der anderen Metalle, der aufgestellten liniaren Gleichung. Die für die Lichtbogenbildung notwendigen Bedingungen mußten sich bei ihm jedoch am leichtesten realisieren lassen. Dies konnte geschehen durch Vergrößern der Stromstärke oder Verkleinern des Abstandes der Elektroden. Es mußte sich hierbei für jede Stromstärke ein gewisser kritischer Elektrodenabstand und für jeden Elektrodenabstand eine bestimmte kritische Stromstärke ergeben, wobei die eine Entladungsform in die andere überging. Bei Zink ist es uns in der Tat gelungen, beide Stromarten gleichzeitig zu photographieren. Die Oscillogramme Fig. 8 und Fig. 9 wurden bei Elektrodenabständen von 0,5 und 1 mm erhalten. Die Entladungsform kann von der einen zur andern Halbperiode ihre Natur verändern. Die Fig. 9 zeigt, daß gerade diejenigen Halbperioden, welche den Lichtbogen zeigen, die höchsten Zündspitzen aufweisen. Gegen Ende der Halbperioden mit eigentlichem Licht-

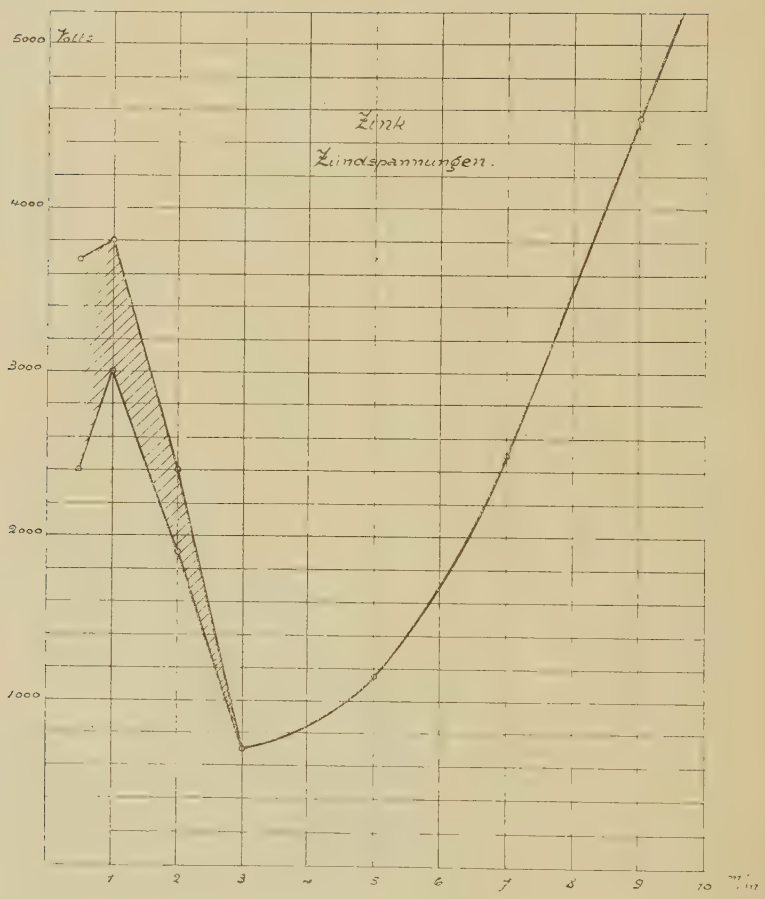

5000 Volt
4000
3000
2000
1000
Zink
Zinkspannungen.
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
min

Fig. 10.

bogen existiert ein Punkt A, von wo an gerechnet der Strom rascher fällt und die Spannung jäh aufsteigt. Es entspricht dieser Punkt ohne Zweifel dem Augenblick, wo die Verdampfung aufhört.

7. Zündspannungen.

Die Gesetzmäßigkeiten der Zündspannungen wurden ausführlich untersucht bei Zink, Silber und Gold. Bei allen drei Metallen war das Verhalten im wesentlichen dasselbe. In der sogenannten normalen Zone, die sich im allgemeinen von ca. 3–4 mm Elektrodenabstand bis zu etwa 9 mm erstreckt, waren die Zündspannungen regelmäßig und wuchsen mit Vergrößerung des Abstandes auf einer immer steiler werdenden Kurve an. Beim Eintritt in die sogenannte unruhige Zone wurden sie sehr unregelmäßig wie das Aussehen des Bogens selbst. In der dritten von Guye und Monasch unterschiedenen kritischen Zone, welche das Gebiet kleinster Elektrodenabstände umfaßt, nahmen die Zündspitzen mit schwindender Bogenlänge nicht ab, sondern wuchsen im Gegenteil stark an und wurden inkonstant. Es sind diese Verhältnisse für das Metall Zink in Fig. 10 graphisch verzeichnet.

8. Die Energie im Bogen.

Die im elektrischen Lichtbogen verbrauchte Energie ist in jedem Augenblick proportional dem Produkte V.J. Die übersichtliche Darstellung der zeitlichen Energieverteilung während einer halben Periode ergibt sich aus Strom- und Spannungskurve durch Multiplikation jeder Elungation des Stromes mit jeder zugehörenden der Spannung (siehe Fig. 11). Der Flächenraum, welcher die

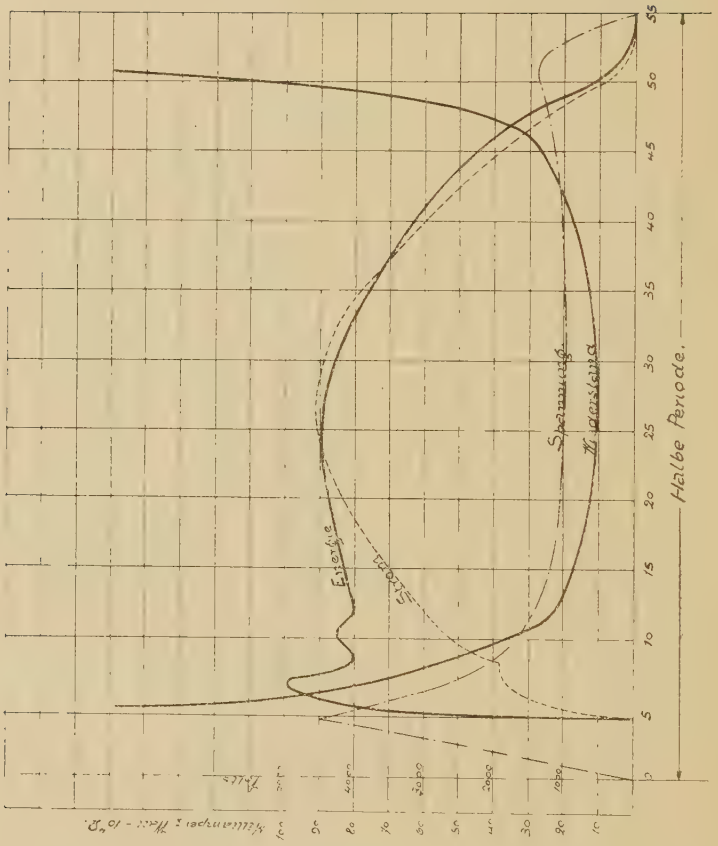


Fig. 11.

erhaltene Wattkurve mit der Nullinie als Zeitachse einschließt, repräsentiert die im Lichtbogen verbrauchte Energie. Die Kurve weist zwei Maxima auf. Das erste entspricht der ersten Amplitude des dem Wechselstrome niedriger Frequenz übergelagerten Wechselstromes höherer Frequenz. Letzterer kommt infolge der Capacitätswirkung des Transformators zustande. Wegen des bedeutenden Widerstands der sekundären Spule klingt diese übergelagerte Schwingung sehr rasch ab, so daß nur die ersten Perioden bemerkbar sind.

Vom energetischen Standpunkt aus sei noch ein Vergleich gegeben zwischen Lichtbogen hoher und niedriger Spannung. Die Versuche von G. Granquist haben gezeigt, daß bei Lichtbogen von mehreren Amper Stromstärke die Bedeutung des Elektrodenmaterials in dem Sinne eine hervorragende sei, daß durch dasselbe weitaus der größte Teil der Bogenenergie in Form von Wärme abgeleitet werde.

Diese Eigenschaft macht den Lichtbogen niederer Spannung untauglich für die Behandlung von Gasen; denn nicht nur daß der größte Teil der Energie verloren geht, richtet ebendieselbe für den Gasraum verlorene Wärmemenge noch Schaden an durch Abbrauch der Elektroden. Demgemäß ist der Hochspannungslichtbogen das geeignete Mittel, unter möglichst geringen Verlusten eine bestimmte Quantität Energie in ein Gasvolumen einzuführen, ohne daß hiebei eine zu bedeutende Menge Energie durch Wärmeleitung verloren ginge und daß die Elektroden, der geringen Stromstärke wegen, in nennenswerter Weise abgebraucht würden. Wenn also bei Lichtbogen niederer Spannung und großen Stromstärken das Elektrodenmaterial seine Bedeutung in dem Sinne geltend macht, daß nämlich durch dasselbe der Hauptteil der Bogenenergie in Form

von Wärme fortgeführt wird, so ist der Hochspannungslichtbogen dadurch charakterisiert, daß bei ihm der Gasraum den größeren Teil der Bogenenergie verzehrt.

9. Ventileffekte.

Ventileffekte, d. h. ungleichartiges Aussehen der beiden Halbperioden des Wechselstromlichtbogens kann durch mehrere Ursachen hervorgerufen werden. Jedesmal handelt es sich um eine Unsymmetrie der Elektroden. Diese Unsymmetrie kann:

1. eine geometrische sein. Das ausgeprägteste Beispiel haben wir, wenn die eine Elektrode eine feine Spitze, die andere eine Platte oder Kugel von sehr großem Radius ist. Die hier auftretende Pumpwirkung wird gleichzeitig von zwei Faktoren begünstigt. Einmal ist der Austritt der Elektronen aus der Spitze ein viel leichterer als aus der Platte. Man kann sich dabei von der Vorstellung leiten lassen, daß an einer Spitze oder scharfem Rand das Elektrostatische-Feld eine Einschnürung erfährt, so daß die Festigkeit des Dielektrikums dort am ehesten erschüttert werden muß. Die konsequente Verfolgung dieser Vorstellung hat zu wichtigen Aufschlüssen über die Durchbruchsfestigkeit von Kondensatoren geleitet.

Der andere für die Unterhaltung des Ventileffektes günstige Moment ist der, daß die Austrittsstelle auf der Spitze festgelegt ist und dieselbe sich erwärmen kann; während das Bogenende auf der Platte bei der geringsten Luftströmung umherwandert, so daß die Wärmeableitung zu Ungunsten der Bogenbildung eine sehr gute ist. Diese Art von Unsymmetrie war bei uns ausgeschlossen, da die Elektroden alle geometrisch vollständig gleich gebaut waren.

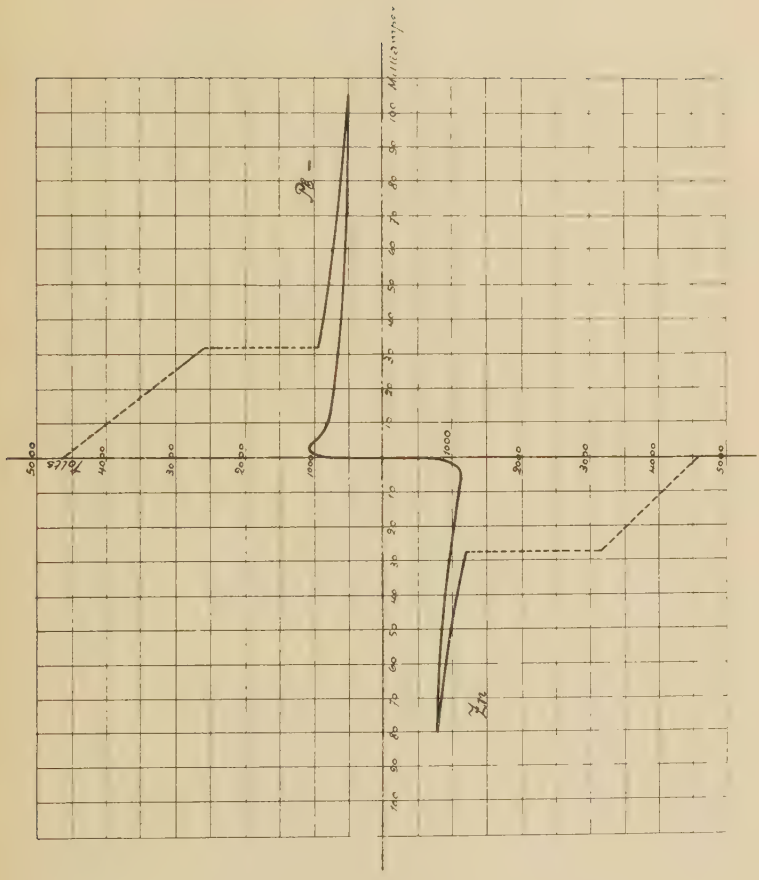


Fig. 12.

2. Die zweite Art der Unsymmetrie kann in der Natur des betreffenden Elektrodenmaterials gelegen sein. H. Th. Simon und G. Granquist fanden bei Lichtbogen niedriger Spannung zwischen Cu und Hg einerseits und Kohle anderseits sehr ausgeprägte Ventilwirkungen. Sie müssen der verschiedenen Wärmeleitfähigkeit der betreffenden Metalle zugeschrieben werden.

Inwieweit ebensolche Erscheinungen beim Hochspannungslichtbogen zu erwarten sind, läßt sich aus den bisherigen Versuchen voraussagen. Da beim Hochspannungslichtbogen das Elektrodenmaterial an Bedeutung, d. h. als energieverzehrendes Element, der Gasstrecke gegenüber zurücktritt, so kann dasselbe auch seinen Einfluß zur Bildung von Ventilwirkungen nicht geltend machen. Die dynamischen Charakteristiken aller schwer schmelzbaren Metalle weichen nur in ihren Zündspannungen von einander ab, während die Spannungswerte im Gebiete von 0,1 Amper keine nennenswerten Unterschiede mehr zeigten. In der Tat konnte bei über 100 Kombinationen zwischen schwer schmelzbaren Metallen keine einzige beachtenswerte Pumpwirkung wahrgenommen werden. Selbst die Zündspannungen scheinen ihre Eigenart infolge gegenseitiger Beeinflussung beider Metalle eingebüßt zu haben.

Die von uns beobachteten Ventileffekte lassen sich in folgenden Gruppen zusammenfassen:

1. Es traten unsymmetrische Entladungen auf zwischen dem leicht schmelzbaren Metall Blei und jedem andern, besonders jedem schwer schmelzbaren Metall. Es möge nur ein Beispiel angeführt werden: der Blei-Zinkbogen. Die Fig. 12 veranschaulicht dessen Verhalten.

2. Das im Verlaufe dieser Arbeit wiederholt beschriebene Verhalten des Zinks ließ erwarten, daß es unter

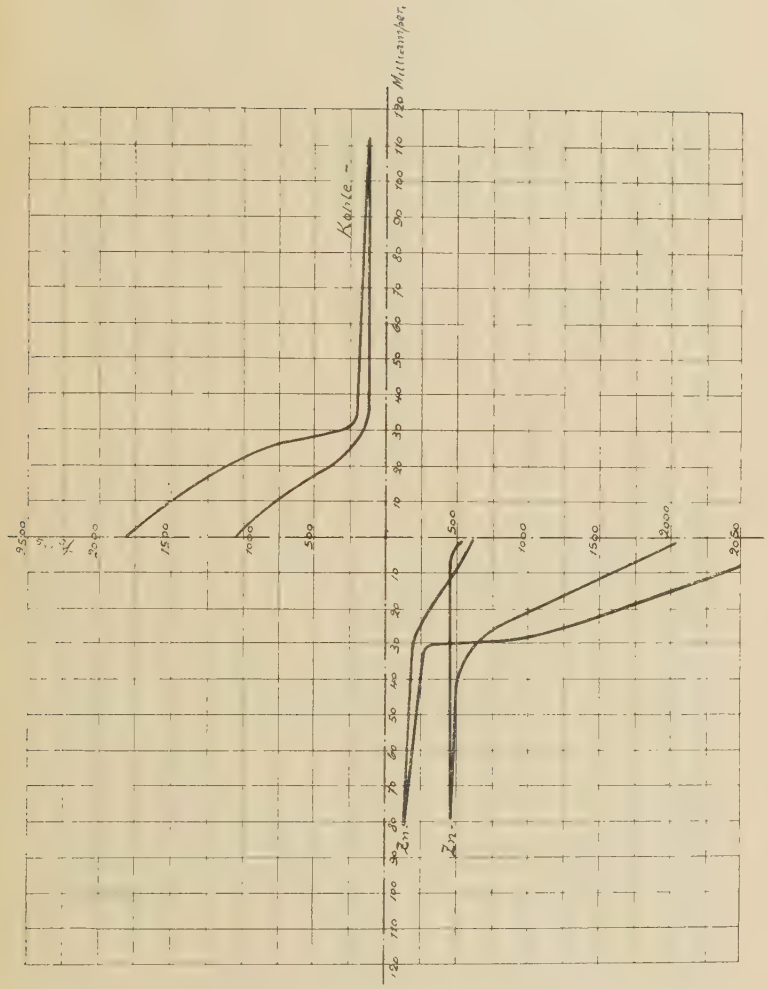


Fig. 13.

besondern Bedingungen, vorzüglich etwa bei sehr kleinem Abstand der Elektroden, wo die Entladungsform auf der eigentlichen Lichtbogencharakteristik sich bewegt, einen Ventileffekt mit anderen schwer schmelzbaren Metallen bilden müßte. Diese Schlußfolgerung konnte in der Tat als richtig konstatiert werden, indem es gelungen ist, z. B. zwischen Kupfer und Zink eine ausgesprochene Ventilwirkung zu beobachten.

Demnach haben wir also bei unserer Suche nach Ventileffekten gerade das angetroffen, was wir, gestützt auf die vorigen Untersuchungen über das gemeinsame Verhalten aller schwer schmelzbaren und das spezifische Verhalten der leicht schmelzbaren Metalle Blei und Zink, erwarten konnten.

3. Von mehreren Experimentatoren sind, wie l. c. erwähnt wurde, Ventileffekte bei diedriger Spannung und großer Stromstärke zwischen Kohle und Metallen beschrieben worden. Es war deshalb von Interesse, diese Verhältnisse auch für unsere Versuchsbedingungen bei 0,1 Amper maximaler Stromstärke klar zu legen. Es möge beispielshalber nur der Kohlen-Zinkbogen angeführt werden. Er wurde photographisch für 1 mm Bogenlänge aufgenommen ; in der Fig. 13 ist das Oscillogramm als dynamische Charakteristik aufgezeichnet. Wir treffen auch hier wiederum die gleiche Erscheinung an, daß nämlich, wie wir schon früher gefunden haben, der Zinkbogen bei kleinem Elektrodenabstand sich sowohl auf der Charakteristik des Glimmstromes als auch der des eigentlichen Lichtbogens bewegen kann.

4. Ausgeprägte Ventilwirkungen sind ferner zwischen Aluminium und der Legierung Magnalium und jedem anderen Metall angetroffen worden, jedoch lassen sich diese letzteren Erscheinungen alle auf einseitige, starke

Oxydbildung bei Aluminium sowohl als bei Magnalium zurückführen.

Da im Vorigen eine Ventilwirkung zwischen Kupfer und Zink angeführt worden ist, so darf zum genauen Verständnis die Bemerkung nicht unterlassen werden, daß in größeren Elektrodenabständen, wo jene zweite Entladungsform beim Zinkbogen nicht auftritt, auch keine Spur einer unsymmetrischen Entladung angetroffen werden konnte.

Zusammenfassung.

Die oben gegebenen Untersuchungen über den hochgespannten Wechselstromlichtbogen lassen sich in Kürze in folgender Weise zusammenfassen:

1. Mit wachsendem Elektrodenabstand nehmen die Flächen der Hysteresisschleifen an Breite zu, verschieben sich zu höheren Spannungswerten und erhalten eine zur Stromachse geneigtere Lage.

2. Die Zündspannung ist eine Funktion der Bogenlänge und des Elektrodenmaterials zugleich; die Spannungswerte der gezündeten Bögen werden mit wachsender Stromstärke vom Elektrodenmaterial unabhängige Größen.

3. Der Inhalt desjenigen Teiles der Hysteresisflächen, welcher dem gezündeten Bogen entspricht, ist um so größer, je niedriger die Schmelztemperatur des betreffenden Metalles liegt.

4. Die Spannungswerte der Hysteresisspitzen sind von der Stromstärke in weiten Grenzen unabhängig. Es konnten keine meßbaren Spannungsdifferenzen konstatiert werden, selbst wenn die maximalen Stromwerte sich wie 1 : 2 verhielten.

5. Die Spitze der dynamischen entspricht einem Punkte der statischen Charakteristik. Das Spannungsgefälle, welches jenen Umkehrpunkten entspricht, ist für Lichtbögen im Gebiete von 0,1 Amper maximaler Stromstärke zwischen allen untersuchten Metallen mit Ausnahme von Blei und Aluminium gegeben durch die Gleichung

$$V = 320 + 60 . d \quad .$$

6. Die Entladung des untersuchten hochgespannten Lichtbogens zwischen schwer schmelzbaren Metallen ist wesentlich verschieden von derjenigen bei niedriger Spannung und großer Stromstärke. Die Vorgänge im hochgespannten Lichtbogen schwacher Stromstärke werden durch die von Guye und Zébrikoff aufgestellten Gleichungen nicht wiedergegeben. Während jene Formeln bei wachsender Stromstärke von so geringen Werten an ein jähes Abfallen der Spannung erheischen, verläuft die Charakteristik des Hochspannungslichtbogens bei mäßigen Elektrodenabständen beinahe parallel zur Stromachse. Für sehr kleine Elektrodenabstände (0,3–1 mm) konnte für das Metall Zink der Übergang von der einen zur anderen Entladungsform konstatiert werden. Jene zweite Entladungsform beim Zink ist als die eigentliche Lichtbogenentladung zu betrachten, für welche die nach dem Vorbild von Ayrton von Guye und Zébrikoff angegebenen Formeln abgeleitet worden sind.

7. Die Zündspannungen verhielten sich in den drei von Guye und Monasch unterschiedenen Zonen verschieden. In der sogenannten « kritischen Zone » sind dieselben relativ sehr hoch und veränderlich ; in der « normalen Zone » wachsen sie mit zunehmendem Elektrodenabstand stetig und werden in der « unruhigen Zone » inkonstant wie das Aussehen des Bogens selbst.

Es existiert deshalb für Zink z. B. bei einer Elektrodendistanz von 3 mm ein Minimum der Zündspannungen.

8. Die sogenannte « kritische Zone » unterscheidet sich, was den gezündeten Bogen betrifft, in keiner Weise von der « normalen Zone ». Der Unterschied liegt einzig im Verhalten der Zündung.

9. Ventilwirkungen konnten, abgesehen von Ungleichartigkeiten in der Zündung, nicht konstatiert werden zwischen schwer schmelzbaren Metallen. Es wurden jedoch ausgeprägte Ventileffekte angetroffen :

a) Zwischen Blei und jedem andern Metall.

b) Zwischen Zink und jedem schwer schmelzbaren Metall, z. B. Kupfer, wenn die Elektrodendistanz nicht mehr als 1 mm betrug.

c) Zwischen Kohle und jedem andern Metall, z. B. Zink, und

d) Zwischen Aluminium oder Magnalium und jedem andern Metall zufolge der ausgeprägten Oxydbildung auf jenen beiden ersten Metallen.

Aus den Resultaten wurden auf die Natur des Hochspannungslichtbogens folgende Schlüsse gezogen :

10. Der hochgespannte Lichtbogen bis zu 0,1 Amper Stromstärke zwischen schwer schmelzbaren Metallen

hat bei Elektrodenabständen von 10 bis hinab zu 0,3 mm den **Charakter des Glimmstromes.**

11. Wenn nach Granquist bei Lichtbögen großer Stromstärke das Elektrodenmaterial seine Bedeutung dadurch geltend macht, daß es den größten Teil der Bogenenergie infolge Wärmeleitung verzehrt, so tritt beim Hochspannungslichtbogen von schwacher Stromstärke jene Bedeutung der Elektroden zurück, während die Gasstrecke als energieverzehrendes Element an Wichtigkeit gewinnt.

Seit dem Abschluß obiger Untersuchungen sind zwei einschlägige Arbeiten [1] erschienen, welche sich einerseits auf Gleichstromlichtbögen, anderseits auf Entladungen in teilweisem Vakuum beziehen und welche hier nicht mehr berücksichtigt werden konnten. Die in denselben gezogenen Schlußfolgerungen bestätigen und kompletieren die Resultate der obigen Arbeit.

[1] W. G. Cady und G. W. Vinal, Ph. Z. **10,** 569, 623, 1909; G. Lange, Dissertation Göttingen, 1909.

CURRICULUM VITAE.

Geboren am 11. April 1884 in Birri bei Muri im Aargau als Sohn des Wendolin Stöckly, durchlief ich vom 7. bis zum 17. Jahre die Volksschulen des Heimatkantons, trat im Frühling 1901 in die Realschule in Schwyz ein und erwarb mir im Herbst 1904 die Maturität zum prüfungsfreien Eintritt ins eidgenössische Polytechnikum. Nachdem ich den ersten Jahreskurs der Ingenieurschule absolviert hatte, wandte ich mich den physikalischen Wissenschaften zu und ließ mich im Herbst 1905 in die naturwissenschaftliche Fakultät der Universität Freiburg immatrikulieren; erwarb mir im Herbst 1906 das Lehrerpatent für die aargauischen Bezirksschulen und vollendete im Herbst 1907 mein Licentiatsexamen. Während des Studienjahres 1907/08 bearbeitete ich die Dissertation und bestand im März 1909 das Doktorexamen.

Ich habe Vorlesungen und Übungen besucht bei den Herren Professoren:

Herzog, Geiser, Fiedler, Hirsch und Heim in Zürich; v. Kowalski, Daniëls, Bistrzycki, Gockel und Baumhauer in Freiburg.

Allen meinen verehrten Lehrern spreche ich den besten Dank aus.

Inhaltsverzeichnis.

Seite

I. Teil. *Geschichte und Theorie des Lichtbogens.*

Einleitung 5

1. Teile des Lichtbogens 6
2. Elektrodenspannung 7
3. Existenzbedingung des Lichtbogens 13
4. Größe und Temperatur der Kraterflächen . . . 16
5. Der Wechselstromlichtbogen 19
6. Die drei Zonen des Lichtbogens 22
7. Die Charakteristiken 24
8. Stabiler und labiler Gleichgewichtszustand . . 27
9. Ventileffekt 29

II. Teil. *Eigene Versuche.*

1. Die Schaltung 32
2. Die dynamische Charakteristik und ihre Abhängigkeit vom Elektrodenabstand 40
3. Das Elektrodenmaterial. 45
4. Die Umkehrpunkte 50
5. Die Entladungsform 52
6. Der kritische Punkt. 57
7. Die Zündspannungen 59
8. Die Energie im Bogen 59
9. Ventileffekte 62
10. Zusammenfassung 67

Freiburg (Schweiz). — St. Paulus-Druckerei.